

**ANÁLISIS DE OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL A ESCALA DIARIA  
APLICADA EN CUENCAS COLOMBIANAS**

**SERGIO STEVEN PARRA CUESTA  
CÓDIGO: 506302**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, D.C  
2019**

**ANÁLISIS DE OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL A ESCALA DIARIA  
APLICADA EN CUENCAS COLOMBIANAS**

**SERGIO STEVEN PARRA CUESTA  
CÓDIGO: 506302**

**Trabajo para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Asesor  
GUILLERMO HERNÁNDEZ TORRES  
Ing. MSc en Recursos Hidráulicos  
Universidad Nacional de Colombia**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
BOGOTÁ, D.C.  
2019**



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá, noviembre, 2019



## **AGRADECIMIENTOS**

Los mejores apoyos del mundo, mi madre María Dioselina Cuesta Jiménez y mi padre Bernabe Parra Martínez, fuente de inspiración, cariño, enseñanzas, sin ellos no habría sido posible llegar donde estoy, ni tener un referente para mis objetivos personales ni profesionales a futuro. Mi hermana Astrid Tatiana Parra Cuesta mi única hermana, me da la responsabilidad de entregar lo mejor de mí para que me tome como ejemplo de vida, con ello encuentre el camino que mejor le guste y llegue lejos en sus objetivos personales. Mi abuela Ana Ema Martínez quien me enseñó la sencillez de la vida, mis padrinos Blanca Lidia Parra Martínez y Julio Cesar Vilbao Roa, quienes me apoyaron durante todo este tiempo de estudio y me siguen apoyando. A mis compañeros de estudio, los mejores éxitos para ellos.

También a la Universidad Católica de Colombia por darme las bases para crear mi perspectiva profesional, darme las herramientas para afrontar este trabajo y mi vida profesional. A los docentes que formaron a ingenieros como yo que están dispuestos a trabajar para la construcción de un mejor país, que con su sabiduría me formaron haciendo posible este trabajo, en especial a los docentes Ing. Guillermo Hernández Torres por su tiempo como tutor en el desarrollo de este trabajo por más de un año, Ing. Luz Doris Vivas, Ing. Wilfredo Marimon Bolivar, Ing. Edwin Alirio Guerrero Raga, Ing. Daniel Andrés López Sabogal, Ing. Guillermo León Cortez Quintero e Ing. Carlos Pastrán Beltran, los mejores docentes que tuve en todo este tiempo de estudio, la comunidad universitaria necesita más profesionales como ustedes.

## CONTENIDO

Pag.

### Tabla de contenido

1. Introducción .....	19
1.1 Antecedentes y justificación .....	20
1.1.1 Antecedentes .....	20
1.1.2 Justificación .....	23
1.2 Planeamiento y formulación del problema.....	24
1.3 Objetivos .....	25
1.3.1 Objetivo general.....	25
1.3.2 Objetivos específicos .....	25
1.4 Marco teórico.....	26
1.4.2 Tipos de modelos matemáticos .....	27
1.4.3 Componentes del modelo y construcción del modelo.....	29
1.4.4 Protocolo de modelación .....	32
1.5 Estado del arte .....	35
1.6 Marco conceptual .....	38
1.7 Alcances y limitaciones .....	42
1.7.1 Alcances .....	42
1.7.2 Limitaciones .....	42
1.8 Metodología.....	42
1.8.1 Identificación de las características hidrológicas, meteorológicas, morfológicas, fisiográficas y ambientales de las cuencas de estudio. ....	42

1.8.2 Implementación los modelos computacionales de balance hídrico diario propuestos a las cuencas y obtener los ajustes de los parámetros de los modelos de acuerdo a las características hídricas de cada cuenca. ....	55
1.8.3 Evaluación el recurso hídrico que se obtiene en distintos puntos de captación de agua del acueducto o sistema de riego, para detectar los impactos de sequía o de crecientes del río.....	65
2. Identificación de características de las cuencas .....	68
2.1 Cuenca del río Coello .....	68
2.1.1 Características morfométricas .....	69
2.1.2 Características hidrológicas.....	70
2.1.3 Características meteorológicas.....	71
2.1.4 Características fisiográficas .....	85
2.1.5 Características ambientales.....	88
2.2 Cuenca del río las Ceibas.....	91
2.2.1 Características morfológicas.....	92
2.2.2 Características hidrológicas.....	94
2.2.3 Características meteorológicas.....	94
2.2.4 Características fisiográficas .....	105
2.2.5 Características ambientales.....	107
3. Modelos hidrológicos .....	111
3.1 Modelo Sacramento .....	111
3.1.1 Almacenamiento en zona superior e inferior.....	112
3.1.2 Distribución de la humedad y flujo interno .....	113
3.1.3 Filtración .....	116
3.1.4 Flujo base y drenaje subsuperficial.....	118
3.1.5 Escorrentía .....	120

3.1.6 Evapotranspiración .....	120
3.1.7 Parámetros del modelo.....	120
3.2 Australian Water Balance Model (AWBM).....	121
3.2.1 Generación de esorrentía .....	122
3.2.2 Descarga y recarga del flujo base .....	123
3.2.3 Estructura del modelo .....	124
3.2.4 Parámetros del modelo.....	126
4. Implementación de los modelos.....	127
4.1 Periodos de calibración y validación .....	127
4.2 Calibración y validación de los modelos.....	128
4.2.1 Cuenca del rio Coello.....	128
4.2.2 Cuenca del rio las Ceibas .....	139
5. Evaluación del recurso hídrico en puntos de captación de aguas .....	151
5.1 Cuenca del rio Coello .....	151
5.1.1 Cajamarca .....	152
5.1.2 Ibagué.....	160
5.1.3 Espinal y Coello .....	174
5.2 Cuenca del rio las Ceibas.....	180
5.2.1 Neiva.....	181
6. Conclusiones .....	189
7. Recomendaciones .....	193
8. Bibliografía .....	195

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pag.</b>
Tabla 1 Clasificación de periodos de clasificación .....	61
Tabla 2 valores referenciales del Criterio de Nash – Sutcliffe .....	64
Tabla 3 Estaciones metereologicas utilizadas en la cuenca del rio Coello .....	71
Tabla 4 Estaciones meteorológicas utilizadas en la cuenca del rio las Ceibas .....	94
Tabla 5 Variables de entrada y salida del modelo Sacramento .....	111
Tabla 6 Parámetros del modelo Sacramento .....	121
Tabla 7 Variables de entrada y salida del modelo AWBM .....	122
Tabla 8 Parámetros del modelo AWBM .....	126
Tabla 9 Periodos de calibración y validación en cuenca del rio Coello .....	127
Tabla 10 Periodos de calibración y validación cuenca del rio las Ceibas .....	128
Tabla 11 Resumen de resultados de calibración y validación en la cuenca del rio Coello .....	128
Tabla 12 Resumen de resultados de calibración y validación en la cuenca del rio las Ceibas .....	139
Tabla 13 Ubicación bocatomas sobre la cuenca del rio Coello .....	152
Tabla 14 Ubicación bocatomas sobre la cuenca del rio Ceibas .....	180

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	<b>Pag.</b>
Ilustración 1: Localización general cuenca rio Coello .....	21
Ilustración 2: Localización de cuenca rio Ceibas .....	22
Ilustración 3 La modelación matemática en la hidrología .....	26
Ilustración 4 Primera etapa del protocolo de modelación .....	33
Ilustración 5 Tercera etapa del protocolo de modelación.....	34
Ilustración 6 Dirección de flujo en el área circundante a la cuenca del rio Ceibas.	43
Ilustración 7 Red hídrica obtenida de los alrededores de la cuenca del rio Ceibas .....	44
Ilustración 8 Código de programación para relleno de información de precipitación .....	47
Ilustración 9 Código de programación para cálculo de precipitación media de la cuenca .....	48
Ilustración 10 Código de programación para relleno de información en cuenca del rio las Ceibas .....	52
Ilustración 11 Ejemplo de AWBM daily time series format .....	62
Ilustración 12 Código de programación en caso de datos faltantes en una base de datos .....	66
Ilustración 13 Ejemplo de QDNR SILO daily time series format .....	67
Ilustración 14 Delimitación de cuenca rio Coello hasta estación Payande .....	68
Ilustración 15 Ubicación de estaciones climáticas usadas en la cuenca del rio Coello.....	72
Ilustración 16 Distribución de los Polígonos de Thiessen de estaciones pluviométricas en la cuenca del rio Coello .....	73
Ilustración 17 Distribución de los Polígonos de Thiessen de estaciones climaticas en la cuenca del rio Coello.....	74

Ilustración 18 Línea de tiempo de datos disponibles de precipitación cuenca del rio Coello.....	75
Ilustración 19 Línea de tiempo de datos disponibles de temperatura cuenca del rio Coello.....	75
Ilustración 20 Mapa de Isoyetas mes de enero .....	76
Ilustración 21 Mapa de Isoyetas mes de febrero .....	76
Ilustración 22 Mapa de Isoyetas mes de marzo.....	77
Ilustración 23 Mapa de Isoyetas mes de abril.....	77
Ilustración 24 Mapa de Isoyetas mes de mayo .....	77
Ilustración 25 Mapa de Isoyetas mes de junio .....	77
Ilustración 26 Mapa de Isoyetas mes de julio .....	77
Ilustración 27 Mapa de Isoyetas mes de agosto .....	77
Ilustración 28 Mapa de Isoyetas mes de septiembre .....	77
Ilustración 29 Mapa de Isoyetas mes de octubre.....	77
Ilustración 30 Mapa de Isoyetas mes de noviembre .....	78
Ilustración 31 Mapa de Isoyetas mes de diciembre .....	78
Ilustración 32 Mapa de isoyetas precipitación media multianual .....	79
Ilustración 33 Mapa uso del suelo de la cuenca del rio Coello .....	86
Ilustración 34 Mapa agrología del suelo de la cuenca del rio Coello .....	87
Ilustración 35 Mapa reservas naturales de la cuenca del rio Coello .....	89
Ilustración 36 Mapa cobertura del suelo de la cuenca del rio Coello .....	90
Ilustración 37 Delimitación cuenca rio Ceibas en estación Guayabo.....	92
Ilustración 38 Ubicación de estaciones climáticas usadas en la cuenca del rio las Ceibas.....	95
Ilustración 39 Distribución de los Polígonos de Thiessen de estaciones pluviométricas en la cuenca del rio las Ceibas .....	96

Ilustración 40 Línea de tiempo de datos disponibles de precipitación y caudal cuenca del rio las Ceibas .....	97
Ilustración 41 Línea de tiempo de datos disponibles de temperatura estación Palacio – Vegalarga cuenca del rio las Ceibas .....	97
Ilustración 42 Línea de tiempo de datos disponibles de temperatura estación Algeciras cuenca del rio Ceibas.....	97
Ilustración 43 Mapa uso del suelo de la cuenca del rio las Ceibas .....	105
Ilustración 44 Mapa agrología del suelo de la cuenca del rio las Ceibas .....	106
Ilustración 45 Mapa reservas naturales de la cuenca del rio las Ceibas.....	108
Ilustración 46 Mapa cobertura del suelo de la cuenca del rio las Ceibas.....	109
Ilustración 47 Modelo sacramento generalizado.....	115
Ilustración 48 Relación del escurrimiento con la lluvia con variabilidad en el almacenamiento superficial .....	123
Ilustración 49 Estructura del modelo AWBM.....	124
Ilustración 50 Mapa de ubicación de puntos de captación de agua en la cuenca del rio Coello.....	151
Ilustración 51 Bocatoma Chorros blancos - Cajamarca .....	153
Ilustración 52 Rejilla lateral de captación de agua Bocatoma Chorros Blancos ..	153
Ilustración 53 Desarenador Bocatoma Chorros Blancos .....	154
Ilustración 54 Ubicación Cuenca Bocatoma Chorros Blancos - Cajamarca.....	155
Ilustración 55 Cuenca bocatoma Dos Quebradas - Cajamarca .....	158
Ilustración 56 Bocatoma el Cay Antigua - Ibagué .....	161
Ilustración 57 Rejilla de fondo Bocatoma el Cay Antigua.....	161
Ilustración 58 Desarenador Bocatoma el Cay Antigua.....	162
Ilustración 59 Rejillas Bocatoma el Cay Nueva .....	163
Ilustración 60 Desarenador Bocatoma el Cay Nueva .....	163



Ilustración 61 Cuenca Bocatoma el Cay - Ibagué .....	164
Ilustración 62 Rejilla lateral Bocatoma Combeima.....	168
Ilustración 63 Rejilla de fondo Bocatoma Combeima.....	168
Ilustración 64 Desarenadores Bocatoma Combeima.....	169
Ilustración 65 Cuenca Bocatoma rio Combeima - Ibagué.....	170
Ilustración 66 Canal de desviación del cauce .....	175
Ilustración 67 Bocatoma USOCOELLO .....	175
Ilustración 68 Vertedero de excesos bocatoma USOCOELLO .....	176
Ilustración 69 Desarenador Bocatoma USOCOELLO.....	176
Ilustración 70 Cauce del rio Coello en bocatoma de USOCOELLO.....	177
Ilustración 71 Cuenca Bocatoma USOCOELLO - Espinal .....	178
Ilustración 72 Mapa de ubicación de puntos de captación de agua en la cuenca del rio las Ceibas .....	180
Ilustración 73 Bocatoma el Tomo.....	181
Ilustración 74 Presa Bocatoma el Tomo .....	182
Ilustración 75 Desarenadores Bocatoma el Tomo .....	182
Ilustración 76 Cuenca Bocatoma en Tomo .....	183
Ilustración 77 Residuos Bocatoma el Guayabo .....	185
Ilustración 78 Bocatoma el Guayabo .....	186
Ilustración 79 Desarenadores Bocatoma el Guayabo.....	186
Ilustración 80 Reservorio Pondaje .....	187
Ilustración 81 Cuenca Bocatoma el Guayabo - Neiva.....	188

## LISTA DE GRÁFICOS

	<b>Pag.</b>
Grafica 1 Ejemplo Scatter Plot en el programa rainfall runoff library.....	57
Grafica 2 Ejemplo Scatter Plot (monthly) en el programa rainfall runoff library.....	57
Grafica 3 Ejemplo Observed and Calculated runoffs en el programa rainfall runoff library .....	58
Grafica 4 Ejemplo Difference of the runoff en el programa rainfall runoff library....	58
Grafica 5 Ejemplo Duration Curve en el programa rainfall runoff library .....	59
Grafica 6 Curva hipsométrica cuenca del rio Coello .....	70
Grafica 7 Horas de brillo solar promedio mensual cuenca del rio Coello.....	79
Grafica 8 Humedad relativa promedio mensual cuenca del rio Coello.....	80
Grafica 9 Temperatura promedio mensual en la cuenca del rio Coello .....	81
Grafica 10 Velocidad del viento cuenca del rio Coello .....	81
Grafica 11 ETo de referencia mensual cuenca del rio Coello .....	82
Grafica 12 Balance hídrico de la cuenca del rio Coello.....	83
Grafica 13 Diagrama de bigotes datos de caudal estación Payande.....	84
Grafica 14 Histograma de frecuencia caudal estación Payande.....	84
Grafica 15 Hidrograma cuenca del rio Coello .....	85
Grafica 16 Curva hipsométrica cuenca del rio las Ceibas.....	93
Grafica 17 Precipitación media mensual cuenca del rio las Ceibas.....	98
Grafica 18 Brillo solar media mensual cuenca del rio las Ceibas .....	98
Grafica 19 Humedad relativa media mensual cuenca del rio las Ceibas .....	99
Grafica 20 Temperatura media mensual cuenca del rio las Ceibas.....	100
Grafica 21 Velocidad del viento media mensual cuenca rio Ceibas.....	100
Grafica 22 ETo mensual cuenca del rio las Ceibas .....	101

Grafica 23 Balance hídrico cuenca del rio las Ceibas.....	102
Grafica 24 Diagrama de bigotes de caudal estación Guayabo .....	103
Grafica 25 Histograma de frecuencia del caudal estación Guayabo.....	104
Grafica 26 Hidrograma cuenca del rio las Ceibas.....	104
Grafica 27 Representación de la demanda de percolación .....	118
Grafica 28 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo Sacramento para datos sin alterar .....	129
Grafica 29 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo AWBM para datos sin alterar .....	130
Grafica 30 Calculado Vs observado en la cuenca del rio Coello del modelo Sacramento sin alterar los datos.....	130
Grafica 31 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo Sacramento en fenómeno del Niño.....	131
Grafica 32 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo AWBM en fenómeno del Niño.....	132
Grafica 33 Curva de duración cuenca del rio Coello en la Validación del modelo Sacramento en fenómeno del Niño.....	132
Grafica 34 Calculado Vs Observado cuenca del rio Coello modelo Sacramento para transición de fenómenos Niño - Niña .....	133
Grafica 35 Calculado Vs Observado cuenca del rio Coello modelo AWBM para transición de fenómenos Niño - Niña .....	133
Grafica 36 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo Sacramento en fenómeno de la Niña.....	134
Grafica 37 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo AWBM en fenómeno de la Niña.....	135
Grafica 38 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo Sacramento en transición de Niña – Niños.....	135
Grafica 39 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo AWBM en transición de Niña – Niños .....	136

Grafica 40 Calibración Vs Validación en cuenca del rio Coello para el modelo Sacramento en ocurrencia normal del clima .....	137
Grafica 41 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo Sacramento en ocurrencia normal del clima .....	138
Grafica 42 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo AWBM en ocurrencia normal del clima .....	138
Grafica 43 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en datos en la validación del modelo Sacramento para los datos sin alterar .....	140
Grafica 44 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en datos en la calibración del modelo AWBM para los datos sin alterar .....	140
Grafica 45 diferencia de escorrentía (calculada - simulada) cuenca del rio las Ceibas en datos en la calibración del modelo AWBM para los datos sin alterar .	141
Grafica 46 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en datos en la validación del modelo AWBM para los datos sin alterar .....	141
Grafica 47 Observado y calculado Vs tiempo cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo Sacramento para fenómeno del Niño .....	142
Grafica 48 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la validación del modelo AWBM para el fenómeno del Niño .....	143
Grafica 49 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo Sacramento para la transición de fenómenos Niño - Niña .....	144
Grafica 50 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la validación del modelo Sacramento para la transición de fenómenos Niño - Niña .....	144
Grafica 51 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo AWBM para la transición de fenómenos Niño - Niña .....	145
Grafica 52 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo Sacramento para el fenómeno de la Niña .....	146
Grafica 53 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo AWBM para el fenómeno de la Niña .....	146
Grafica 54 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo Sacramento para ocurrencia normal del clima .....	148
Grafica 55 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la validación del modelo Sacramento para ocurrencia normal del clima .....	149

Grafica 56 Calibración Vs Validación cuenca del rio las Ceibas del modelo AWBM para ocurrencia normal del clima .....	149
Grafica 57 Diferencia de esorrentía cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo AWBM para ocurrencia normal del clima .....	150
Grafica 58 Caudal simulado en bocatoma Chorros Blancos con Sacramento calibrado con fenómeno del Niño.....	156
Grafica 59 Caudal simulado en bocatoma Chorros Blancos con Sacramento calibrado con fenómeno de la Niña.....	156
Grafica 60 Caudal simulado en bocatoma Dos Quebradas con Sacramento calibrado con fenómeno del Niño.....	159
Grafica 61 Caudal simulado en bocatoma Dos Quebradas con Sacramento calibrado con fenómeno de la Niña.....	159
Grafica 62 Caudal simulado en bocatoma el Cay con Sacramento calibrado con fenómeno de la Niña.....	165
Grafica 63 Caudal simulado en bocatoma el Cay con AWBM calibrado con fenómeno del Niño.....	165
Grafica 64 Curva de duración cuenca rio Coello modelo AWBM en fenomeno del Niño, aplicada a la estación Bocatoma .....	166
Grafica 65 Caudal simulado en bocatoma el Cay con AWBM calibrado con fenómeno de la Niña.....	166
Grafica 66 Caudal simulado en bocatoma Combeima con Sacramento calibrado con fenómeno del Niño .....	171
Grafica 67 Curva de duración cuenca rio Coello en fenomeno del Niño, aplicada a la estación Montezuma .....	172
Grafica 68 Caudal simulado en bocatoma Combeima con Sacramento calibrado con fenómeno de la Niña .....	173
Grafica 69 Curva de duración cuenca rio Coello modelo Sacramento en fenomeno del Niño, aplicada a la estación Montezuma.....	173
Grafica 70 Caudal simulado en bocatoma USOCOELLO con Sacramento calibrado con fenómeno del Niño .....	179
Grafica 71 Caudal simulado en bocatoma USOCOELLO con Sacramento calibrado con fenómeno de la Niña .....	179

Grafica 72 Caudal simulado en bocatoma el Tomo con Sacramento calibrado con  
ocurrencia normal del clima .....184

## 1. Introducción

Los avances tecnológicos están avanzando a pasos agigantados, a tal punto que está eliminando puestos de trabajo que realizan labores rutinarias. Hasta el momento la ley de Moore se cumple, la cual trata de que “la capacidad de las computadoras aumenta 100% cada 18 meses”(Oppenheimer 2018) basado en un artículo de Gordon Moore, cofundador de Intel. Actualmente se implementa inteligencia artificial para aprendizaje de nuevas características comunes, por ejemplo, las traducciones de Google traductor hace unos años no eran de los mejores, ahora con un grupo colaborativo de personas alrededor del mundo se tienen mejores traducciones, de los cuales la inteligencia artificial toma provecho para mejorar (Oppenheimer 2018). Los avances tecnológicos han ayudado a profesionales alrededor del mundo a solucionar problemas comunes o de investigación, (Oppenheimer 2018) por ello una de las tantas aplicaciones es posible tomarla de herramienta para el estudio hidrológico.(Dominguez Calle 2000)

En este trabajo se aplican modelos hidrológicos a escala diaria cuya finalidad consiste en conocer la oferta hídrica superficial de la cuenca, como se dijo anteriormente se aplicará la tecnología actual y con ello podremos comprender el comportamiento del agua en una cuenca hidrográfica. Para comprender un poco el proceso se sugiere iniciar con lo dicho por Ponce en su libro Engineering Hydrology (Ponce 1989), donde postula distintos tipos de modelos hidrológicos en base al enfoque matemático y/o físico, el cual será explicado detalladamente en este documento, la aplicabilidad y el objetivo del mismo. En las variables de ingreso se debe tener una precipitación sobre el área de estudio, variables climatológicas y una escorrentía o caudal conocidos, donde el objetivo de estudio depende del modelo a aplicar. Para este trabajo se aplicó dos modelos hidrológicos llamados Sacramento y Australian Water Balance Model o AWBM, los dos son semejantes en ser modelos formales, conceptuales y agregados (National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA 2002) (Boughton 2004), esto quiere decir que se basan matemáticamente para simular el comportamiento del agua en la cuenca, basándose en conceptos físicos teóricos aplicables en toda la cuenca en general que luego se podrá destinar para cualquier parte de una cuenca hidrográfica (Ponce 1989).

Para una correcta ejecución del trabajo se implementó el Protocolo para la modelación matemática de procesos hidrológicos propuesto por Domínguez (Dominguez Calle 2000) y el libro anteriormente nombrado de Ponce (Ponce 1989), donde se deben determinar las características de precipitación, clima que abarca la temperatura, brillo solar, humedad relativa, velocidad del viento y evapotranspiración media de la cuenca, características del suelo como lo son la cobertura vegetal, características físicas de la superficie y el uso del suelo, la caracterización morfométrica de la cuenca, y por último un estudio del comportamiento del caudal en estaciones de registro. Luego de caracterizar esto se puede iniciar al protocolo de calibración y validación en los puntos de cierres evaluados en distintos

fenómenos climáticos que afectan al país.

Una vez se obtienen los parámetros se simulan los modelos en puntos de captación de agua para uso económico y habitacional de la zona, así mismo como se verían afectadas por los fenómenos climáticos para la prevención de desastres o déficit del recurso hídrico.

## **1.1 Antecedentes y justificación**

### **1.1.1 Antecedentes**

El modelo Sacramento es un modelo hidrológico diario que fue creado en Estados Unidos en el año 1973 por el Centro de Proyectos de Río Federal y Estatal, el Servicio Meteorológico Nacional y el Departamento de Estado de California de Recursos Hídricos. Este modelo ha sido implementado en cuencas alrededor del mundo por investigadores (Ponce 1989), pero en este caso se analizó la implementación de este en Colombia. Los primeros registros en los cuales se adoptó el modelo datan del año 1976, donde el Servicio Colombiano de Hidrología y Meteorología (SCMH) utilizó el modelo Sacramento para la predicción hidrológica, se ingresaba la información del modelo en tarjetas perforadas y los resultados eran transmitidos por medio telefónico y radio para la prevención de desastres en temporadas invernales. (Domínguez Calle, Angarita y Rivera 2010)

Luego a inicios y mediados de la década de los 90, la SCMH usó distintos modelos de carácter internacional buscando la predicción de eventos hidrológicos, en materia de inundaciones y en tiempo real, los modelos utilizados fueron el Hec-1, Hec-2, HBV, Sacramento, etc. Pero se llegó a la conclusión de que no cumplieron con las perspectivas que se tenían. (Lozano 2008)

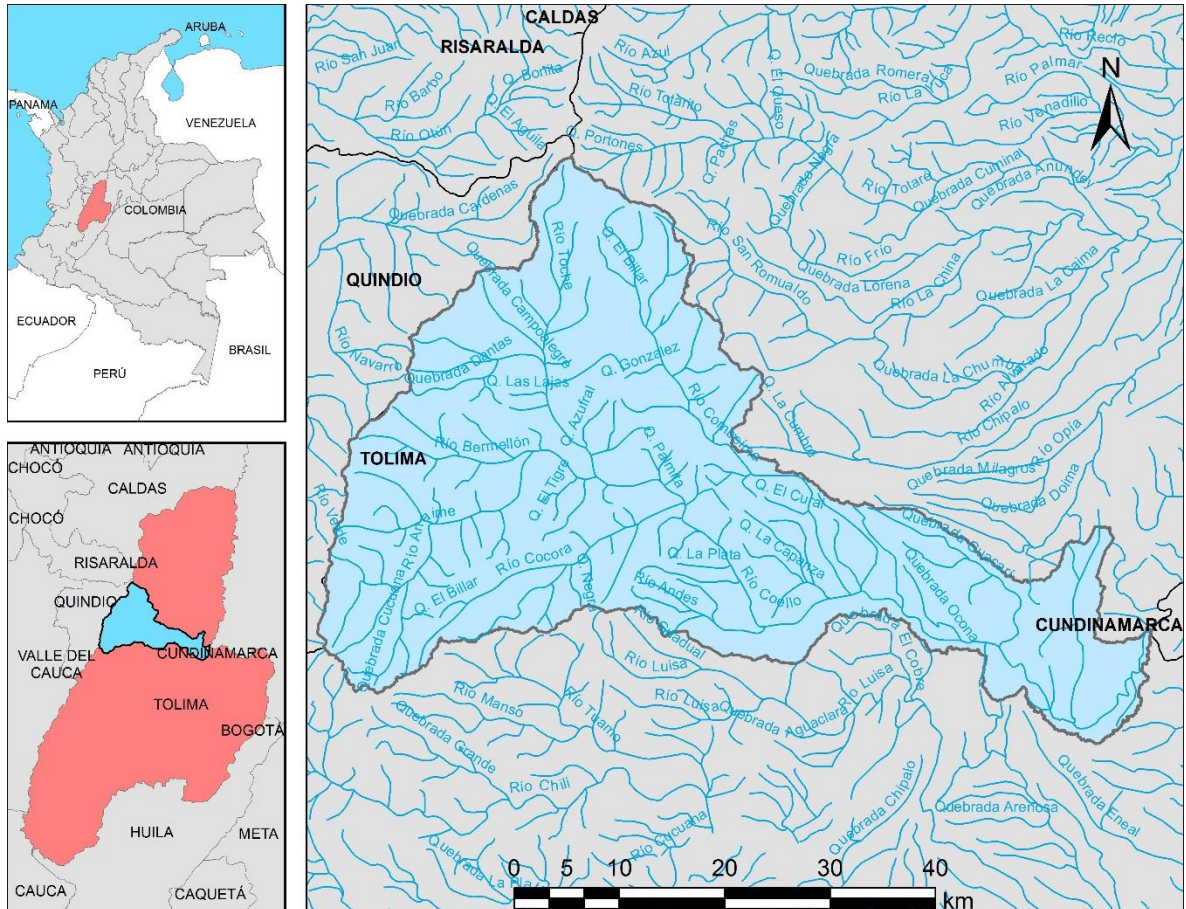
El Modelo Australian Water Balance Model (AWBM) fue desarrollado a principios de la década de los 90 por Walter Boughton, fue estudiado y creado con información de 19 cuencas de Australia, (Boughton 2004) actualmente es el modelo más aplicado en Australia. (Jason [sin fecha]) En el año 1999, se implementó el modelo AWBM de forma satisfactoria en la cuenca del Río Cabuyal, ubicada en el Departamento de Cauca, donde a pesar de la escasa información de precipitación y caudal del río, se hizo el modelamiento, aunque la proyección se pudo realizar en un periodo corto de tiempo, alrededor de 3 años, los resultados fueron los esperados. El autor recomienda este modelo y su aplicación en el país, pero advierte que este no será efectivo en áreas llanas, debido a que no toma en cuenta la pérdida por percolación profunda. (Fraiture, Rubiano y Alvarez 1999)

Las cuencas a las cuales se les aplicó los modelos hidrológicos diarios nombrados anteriormente fueron las cuencas del río Coello y río Ceibas. El río Coello se extiende desde la parte más alta del Nevado del Tolima, hasta desembocar en el río Magdalena y se encuentra ubicada en el centro del departamento del Tolima



abarcando los municipios de Cajamarca, Espinal y la ciudad de Ibagué, como se observa en la Ilustración 1. La cuenca mayor del río Coello posee desde el origen hasta su desembocadura una longitud de 124.74 km, con un área total de 1842,57  $km^2$ . (Corporación Autónoma Regional del Tolima [sin fecha])

Ilustración 1: Localización general cuenca río Coello



Fuente: Propia

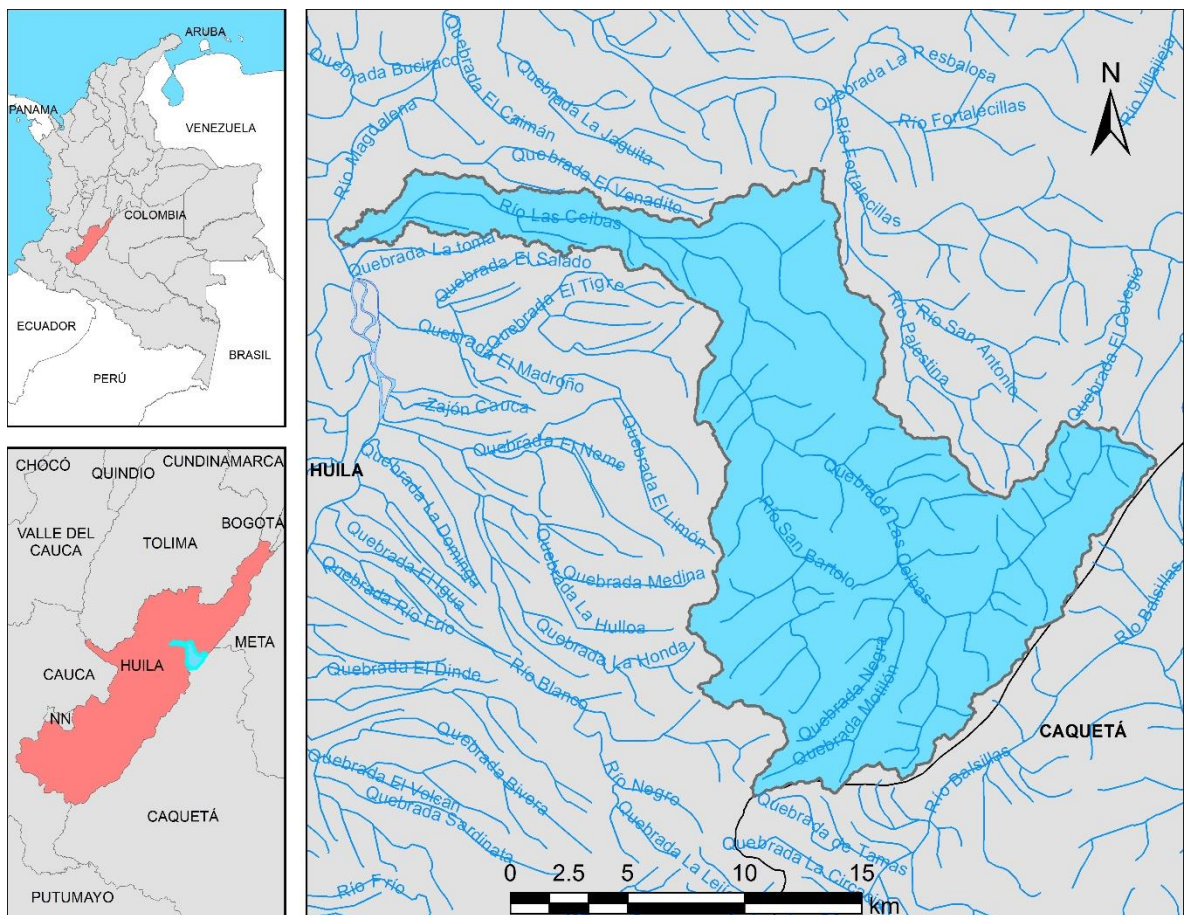
La cuenca ha sido estudiada por la Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA) en la cual describe las principales características del suelo, la biodiversidad, la geología y la hidrología superficial, el estudio que interesa en este caso es el hidrológico. Para este estudio se tomaron en cuenta algunas estaciones hidrológicas y meteorológicas de propiedad del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Para la estimación de oferta hídrica superficial dice textualmente que “se adoptó la metodología del Modelo de Simulación Hidrológica Caudal, basado en el Método del Numero de Curva de escorrentía (NC o CN) del Servicio de Conservación de Suelos de los Estado Unidos (SOIL CONSERVATION SERVICE – SCS), desarrollado con base en la estimación directa

de la escorrentía superficial de una lluvia aislada a partir de las características del suelo, uso del mismo y la cubierta vegetal”. (Corporación Autónoma Regional del Tolima [sin fecha])

En la cuenca se han trabajado algunos modelos hídricos, uno fue el modelo hidrológico SWAT, este modelo maneja distintos parámetros además de los hidrológicos, como características del suelo y topográficos. Los resultados finales de este análisis dieron con resultados de proyección o simulación sobreestimados, pero con un buen ajuste. (Castañeda 2016)

En el caso del río Ceibas, este se encuentra ubicado en el centro-norte del departamento de Huila como se observa en la Ilustración 2, el río Ceibas recorre desde altas montañas, con topografía accidentada hasta desembocar en el río Magdalena, la cuenca tiene hasta su desembocadura un total de  $299.68 \text{ km}^2$ . (Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena [CAM] [sin fecha])

Ilustración 2: Localización de cuenca río Ceibas



Fuente: Propia

La Corporación Autónoma Regional del Alta Magdalena (CAM) realizó distintos estudios en esta zona, en la cual, en el estudio hidrológico se tomaron varias estaciones meteorológicas y limnimétricas pertenecientes al IDEAM. Con información de distintas estaciones limnimétricas se reconoce el recurso hídrico disponible en la cuenca, entre las que están la estación Guayabo, Motilon, Pueblo nuevo, la Palma y Hato Bermejo a las cuales “se hicieron graficas independientemente con el objetivo de poder reconocer la variación de caudales medios en el tiempo en cada una de las microcuencas o sectores del río Las Ceibas” (Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena [CAM] [sin fecha]) por lo anterior no se efectuó un estudio para el cálculo del recurso hídrico de la cuenca.

### 1.1.2 Justificación

El estudio del agua en la ingeniería civil tiene gran importancia, de acuerdo con Franco: “las inundaciones son eventos “naturales” en muchos casos exacerbados por el hombre, debido a su efecto sobre el territorio” (Franco Idarraga 2010), lo que conlleva a que toda estructura que cumpla una función en la sociedad puede ser afectada por eventos naturales severos y en muchos casos va en función de la modificación del entorno, en vista de que se realizan modificaciones al sistema hídrico y a la ocupación indebida del hombre en zonas de alto riesgo (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 2015). Para identificar posibles problemas y de ayuda para la toma de decisiones, se recurren a modelaciones hidrológicas ejecutadas en el entorno, con ello encontrar posibles focos de riesgo para la integridad de las personas, (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 2015) según (Beven 2010) “el objetivo final de la predicción con modelos debe ser mejorar la toma de decisiones sobre un problema hidrológico, la protección contra inundaciones, la mitigación de la contaminación y la concesión de licencias”. Todavía cabe señalar que con la modelación es posible evaluar el recurso hídrico disponible para la distribución a municipios, producción y mantenimiento del ecosistema (Domínguez et al. 2008). En los últimos años en Colombia han ocurrido eventos catastróficos, un ejemplo es el daño que sufrió una bocatoma en la quebrada que surte de agua a Manizales, la cual colapso por el represamiento de agua, provocando daños en la tubería principal de 28 pulgadas, además que un deslizamiento causó daños en otras tuberías, todo esto debido a un evento extremo donde 48 horas de lluvia que detonó estos daños, al mismo tiempo cerca de 370 familias fueron damnificadas por deslizamientos. (El tiempo 2008) Por el contrario, la sequía puede ser grave para una región, dado que se identifica principalmente como la disminución de la oferta hídrica disponible, esto puede derivar a eventos meteorológicos e hidrológicos que afectan la disponibilidad de agua tanto superficial, como subterránea. (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 2015) Para ilustrar mejor los acontecimientos de sequía, en el departamento de Sucre, donde por lo menos 6000 cabezas de ganado murieron por cerca de cinco meses sin lluvia, impidiendo el crecimiento de pasto. (Shadia Freyle 2019)

La cuenca del río Coello es de gran importancia en la zona, ya que esta surte de agua a los acueductos de los municipios de Ibagué, Coello, Espinal y Cajamarca, todos en el departamento del Tolima, además de surtir de agua al distrito de riego Usocoello, este distrito reparte de agua a distintos cultivos como arroz, algodón, mango, melón, plátano, entre otros. (Usocoello 2013) Este distrito de riego es de gran importancia económica de sus pobladores rurales, al contar con pequeños agricultores que siembran frutos que se distribuyen en la zona o llevados a distintas zonas del país, como grandes empresas como Florhuila, Fedearroz, Arroz Diana, Arroz Roa, Arroz Caribe, Molinos Santa Mónica, organización Pajonales, etc. Ibagué es la capital del Tolima, este tiene una atracción de turismo y comercio donde las administraciones de algunas empresas arroceras se encuentran allí, así mismo de diversos objetos de producción tienen su sede principal en esta ciudad. Ibagué cuenta con cerca de 574,573 habitantes, (Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE 2010) la cual está cerca de la ruta 40, esta ruta va desde Buenaventura en el Valle del Cauca hasta Puerto Carreño en el Vichada, una sección de este trayecto pasa al lado de Ibagué, hacia el reconocido sector llamado Alto de la Línea. (Instituto Nacional de Vías - INVIAS [sin fecha]).

Conjuntamente se consideró el río Ceibas, este es la principal fuente hídrica del acueducto de Neiva, la cual es la capital del departamento del Huila, este municipio alberga cerca de 349,030 habitantes, (Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE 2010) este municipio destaca por ser productor agrícola y ganadero del país, y por ello se tienen distintas concesiones con agricultores de la zona para el uso del agua en cultivos como cacao y arroz, además de ser utilizado en la ganadería. (Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena [CAM] [sin fecha]) Según sus pobladores la mayoría de la población del Huila reside en la ciudad, en vista de que posee distintos centros de educación superior, empresas grandes y hoteles en alrededores y en el centro de la ciudad.

La diversificación de las cuencas del río Coello y Ceibas permite evaluar los modelos hídricos en dos condiciones distintas del suelo, topográficas, climáticas, etc., estas diferencias son de ayuda para comparar el ajuste del modelo en distintos ambientes del territorio colombiano, también la efectividad de cada modelo a cada cuenca y a la información disponible en cada una, con la intención de encontrar el modelo que mejor concuerde con las características hídricas de la cuenca en diferentes escenarios climáticos.

## **1.2 Planeamiento y formulación del problema**

El trabajo se enfocó en la implementación de los modelos de balance hídrico diario Sacramento y AWBM, donde ha mostrado ser eficientes en otros países (e.g. EE.UU. o Australia)(Jason [sin fecha]), pero se han implementado muy poco en Colombia, y este estudio ayudará a la planificación del recurso hídrico de la cuenca, la cual da abastecimiento a actividades del hombre, y según Domínguez (Domínguez et al. 2008) “es necesario que las corrientes abastecedoras mantengan



un remanente de agua para atender los requerimientos hídricos de los ecosistemas asociados a sus cauces, preservando así su biodiversidad, productividad y estabilidad”. Con la disposición de estaciones limnimétricas, se calibró, validó y simuló con los modelos la escurrimiento superficial en los puntos de las estaciones durante algunos años que se tengan registros. Para medir el desempeño de los modelos en la cuenca, durante los períodos de calibración y validación, se midió el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, este es el más utilizado en Hidrología. El coeficiente mide la incertidumbre de las observaciones con lo calculado por el modelo. Si se tiene una simulación perfecta, el coeficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe es igual a 1. (Moriassi et al. 2007) Con esto se concluye la adaptación de los modelos a las características topográficas, meteorológicas e hidrológicas de las cuencas de estudio.

Las cuencas a las cuales se les interpusieron la modelación, presentan una alta demanda hídrica por parte de acueductos y distritos de riego, por ende, son hidrosistemas vitales para el abastecimiento de agua para consumo doméstico, en la producción de alimentos y mantenimiento del ecosistema(Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena [CAM] [sin fecha]). Al tener los valores apropiados de los modelos en cada cuenca, se simulará para obtener valores aproximados del recurso hídrico en puntos de interés de las cuencas, como bocatomas de acueducto o de distrito de riego y concluir el comportamiento del recurso en estos puntos, identificando periodos de déficit o crecientes que pueden afectar esta infraestructura.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

- Estimar el comportamiento de la oferta hídrica superficial en cuencas del río Coello y Ceibas para el abastecimiento de los acueductos de Ibagué y de Neiva, por medio de modelos de balance hídrico diario

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

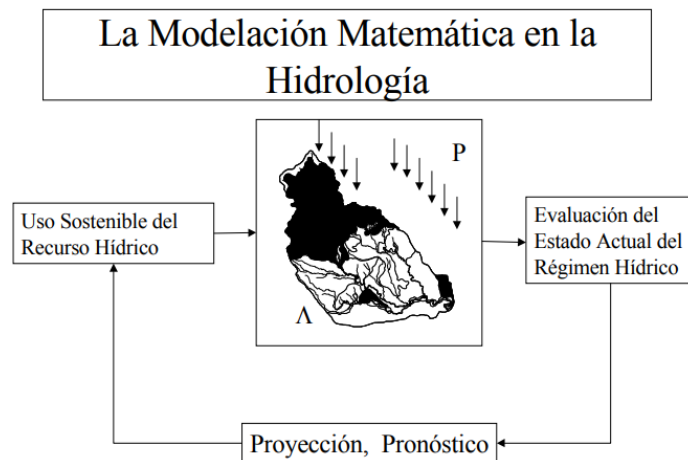
- Identificar las características hidrológicas, meteorológicas, morfológicas, fisiográficas y ambientales de las cuencas de estudio.
- Implementar los modelos computacionales de balance hídrico diario propuestos a las cuencas y obtener los ajustes de los parámetros de los modelos de acuerdo a las características hídricas de cada cuenca.
- Evaluar el recurso hídrico que se obtiene en distintos puntos de captación de agua del acueducto o sistema de riego, para detectar los impactos de sequía o de crecientes del río.

## 1.4 Marco teórico

El agua tiene un espacio donde circula libremente que constituyen el ciclo hidrológico, este es llamado hidrósfera, se extiende desde 15 km de altitud hasta 1 kilómetro bajo tierra. El agua en este sitio realiza los distintos procesos del ciclo del agua, como la evaporación, escorrentía, infiltración, almacenamiento, etc. El agua es de los elementos más esenciales de la vida en nuestro planeta, de tal importancia que abarca gran parte de la superficie terrestre, es tal la cantidad de agua en nuestro planeta que, si el planeta fuera perfectamente esférico, el suelo quedaría a 2.6 kilómetros de profundidad. El agua salada abraza cerca del 96.5% del agua del planeta, el agua dulce comprende solamente el 3.5% de este líquido el disponible para consumo humano es muy poca, cerca del 0.1%, este es el porcentaje de agua que se encuentra en la superficie. (Chow, Maidment y Mays 1994) El estudio del comportamiento del agua en la atmósfera terrestre incluye gran cantidad de variables y análisis complejos, dependiendo de las variaciones temporales y/o espaciales. El uso de análisis computacional ha aumentado la modelación hidrológica, con esto se puede obtener información esencial para la predicción de eventos meteorológicos y de sucesos hidrológicos en la tierra. (Ponce 1989)

De acuerdo con Domínguez (Dominguez Calle 2000) la implementación de modelos matemáticos que describen procesos naturales, esto se puede utilizar como ayuda para la toma de decisiones. La modelación hidrológica tiene por objetivo resolver los problemas propuestos en la Ilustración 3:

Ilustración 3 La modelación matemática en la hidrología



Fuente: (Dominguez Calle 2000)

Primero se debe evaluar el estado actual del recurso, donde se fije un marco de referencia del estado del recurso hídrico, establecido en cierto punto de cierre, pero implementar estaciones de observación en infinitos puntos no es viable económicamente y además de que los diseños no se podrían llevar a cabo. De aquí

el uso de la modelación hidrológica, donde luego de optimizar el modelo se puede observar el régimen hidrológico de cualquier punto local de la cuenca, es viable económicamente y preciso desde el punto de vista técnico.

De lo anterior se puede agregar que para efectuar un uso sostenible del agua es necesario evaluar las influencias que afecten el recurso hídrico, que con el uso de la modelación se puede realizar.

La modelación tiene en cuenta los distintos aspectos que pueden ser una pieza fundamental que delimite el recurso hídrico, tomando los datos obtenidos a través de las estaciones y estructurando de forma matemática los procesos naturales que ayuden a profundizar el proceso de estudio.

#### 1.4.1.1 Clasificación de modelos

Teniendo en cuenta lo dicho por Ponce (Ponce 1989) los modelos hidrológicos aplicables a una cuenca pueden ser de dos grandes categorías:

- Modelo material: se caracteriza por tener una representación física de una cuenca, esta cuenta con una estructura un poco más simplificada, y la hace más parecida a la de un prototipo. Este modelo se destaca por estar representada en una maqueta la cual tiene simuladores de lluvia que están esparcidos en una cuenca experimental, y esta a su vez simula las propiedades del suelo real, con un material que imitan el comportamiento de este. La aplicación de estos modelos es costosa y de muy poca aplicabilidad, ya que únicamente se basa en la cuenca que se realiza el estudio.
- Modelo formal: en esta se tienen formulaciones matemáticas en la cual idealiza un comportamiento tomado de un prototipo. Los modelos formales o matemáticos donde es necesario la asistencia de un equipo computacional, a esto se le denomina modelos computacionales. Los modelos computacionales están a disponibilidad de cualquier hidrólogo, además de ser muy flexibles, en cuanto a la aplicación esos en distintas situaciones meteorológicas y más accesibles económicamente.

Los siguientes temas se basan en modelos formales, ya que los modelos hidrológicos que se aplicarán en las cuencas son de este tipo.

#### 1.4.2 Tipos de modelos matemáticos

Los modelos matemáticos contienen distintas fórmulas, de las cuales se basan según la formulación teórica, conceptual o empírica, lo cual da libertad de usar cualquier tipo de análisis matemático, ya sea de probabilidad, calculo, variabilidad en el tiempo, etc. En el modelamiento se identifican cuatro tipos (Ponce 1989):

- Modelos determinísticos: estos modelos se rigen de fórmulas físicas o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales. La aplicación de

estas fórmulas implica un análisis de causa-efecto entre todas las variables escogidas que aplican en el modelo. Estos tipos de modelos deberían dar mejores detalles sobre los factores físicos y químicos.

- Modelos probabilísticos: totalmente opuestos a los determinísticos, ya que este analiza las variables siguiendo la teoría del azar, aplicando probabilidad. Estos pueden ser de dos tipos: el estadístico trata solo de observación de elementos. El estocástico observa las series hidrológicas con respecto al tiempo. Por ejemplo, los métodos de probabilidad utilizados en hidrología, como el método de Gumbel, el cual es utilizado para hallar el caudal máximo producido por una cuenca en un tiempo de retorno.
- Modelos conceptuales: son simplificaciones de procesos físicos, en las que recaen en formulaciones matemáticas que simulan los procesos hidrológicos, y basándose en parámetros conceptuales. Un ejemplo de esto es la cascada de reservorios donde producen suficiente difusión de modo que la escorrentía y el almacenaje son simulados correctamente, para llegar a estos resultados en necesario los datos de lluvia-escorrentía medios y determinar valores apropiados a las variables.
- Modelos paramétricos: son los más simples en comparación de los otros modelos. Estos consisten en un conjunto de ecuaciones algebraicas, en el que contienen parámetros, en donde son asignados por un análisis de datos.

A continuación se comparan distintos tipos de modelos según Ponce (Ponce 1989), los cuales son contrarios entre sí, y se tiene en cuenta a la hora de elegir un modelo adecuado a la circunstancia que se quiere aplicar:

- **Modelos lineales Vs Modelos no lineales**

Los modelos lineales tienen complicaciones en la naturaleza, ya que los factores físicos no tienen este comportamiento, por el contrario, se utilizan modelos no lineales que ajusten mejor. El uso de métodos lineales es muy simple de utilizar, pero no se ajusta de manera adecuada a los datos, en cambio el uso de modelos no lineales es más complejo su análisis, pero su ajuste es mejor.

- **Modelos de tiempo invariable Vs Modelos de tiempo variable**

Esto quiere decir que si las variables dependen directamente con el tiempo o permanecen constantes. En la práctica, estas aplicaciones se han restringido únicamente en modelos invariables del tiempo.

- **Modelos agregados Vs Modelos distribuidos**

Es decir que, si un modelo varía espacialmente o no, por ejemplo, al evaluar una cuenca puede hacer la diferencia si se evalúa la cuenca totalmente, o si se evalúa microcuencas individualmente. Al evaluar la cuenca con modelos distribuidos, es decir, con cada microcuenca, el resultado por razones lógicas es más preciso, pero,



en consecuencia, se debe tener mayor información detallada de la zona y requiere más procesamiento computacional. En su lado contrario, al aplicar un modelo agregado, lo cual se tiene en cuenta toda la cuenca, es necesario menor detalle, el procesamiento computacional es menor y los resultados de este tipo de análisis, por ejemplo, un hidrógrama puede ser aplicado a toda la red hidrográfica, ya que se utilizaron datos disponibles en toda la cuenca.

- **Modelos continuos Vs Modelos discretos**

Matemáticamente quiere decir, si se tienen una función y a esta se le puede hallar la derivada en cualquier punto de esta, quiere decir que es continua, pero si la ecuación no se le puede aplicar la derivada en cualquier punto, esta es discreta. Las funciones discretas son utilizadas ampliamente en hidrología, por ejemplo, los hietogramas de lluvia son discretos.

- **Modelos analíticos Vs Modelos numéricos**

Aquel depende directamente de que si se tiene un modelo continuo o un modelo discreto, ya que, si se tiene un modelo continuo, este se soluciona analíticamente, como la transformada de Laplace, mientras que, con los modelos discretos se resuelven con métodos numéricos, donde se utiliza ampliamente la computación, debido a su alta complejidad.

- **Modelos de eventos asilados Vs Modelos de procesos continuos**

Los eventos aislados, como su nombre lo indica, son a corto plazo, por ejemplo, un modelo hidrológico es diseñado principalmente para analizar la filtración y la escorrentía superficial, y su finalidad es la estimación de escorrentía directo. Las aplicaciones de estos modelos son solamente adaptables a eventos de inundación, ya que no toma en cuenta la recuperación de humedad entre eventos, por esto la simulación no se ajusta a eventos en tiempo seco.

A diferencia del anterior, los modelos de procesos continuos, toma en cuenta todos los componentes de la escorrentía superficial y la escorrentía indirecta o subterránea. Estos modelos se focalizan en la evapotranspiración y en otras variables hidrológicas, además de que estos modelos son aplicados a largo plazo, por lo tanto, tiene en cuenta la recuperación de humedad durante los periodos de sequía, el principal objetivo de los modelos es el balance hídrico de la cuenca. Estos modelos se adaptan según el periodo de tiempo que se analice.

#### 1.4.3 Componentes del modelo y construcción del modelo

Basándose en Ponce (Ponce 1989) los componentes de un modelo hidrológico son: 1. Precipitación; 2. Abstracción hidrológica; 3. Escorrentía superficial. A continuación, la definición de cada uno según este autor:

#### 1.4.3.1 Precipitación

Este es el dato de entrada al modelo. La escorrentía superficial va en función de la intensidad de la lluvia, la precipitación puede ser descrita en:

- a. Intensidad: esta varía en el tiempo y espacio, para la práctica es necesario utilizar promedios espaciales y temporales, de modo que se obtenga una representación útil de lluvia. Dependiendo de la tormenta, ya sea una intensa, pero con poca duración y aplicada en un área pequeña, o sea una tormenta suave, pero prolongada y extendida en mucha área, ya sea una de alta o baja intensidad, ambas tienen escorrentía de dimensión diferente.
- b. Duración de lluvia: estas pueden variar desde lluvias de unos pocos minutos, a días enteros. Según la propiedad de concentración de escorrentía superficial, las cuencas más pequeñas alcanzan una proporción de escorrentía más rápidamente que en cuencas medianas y grandes así que estas se analizan asumiendo un flujo concentrado. Para una cuenca mediana, esta normalmente se analiza como subconcentrada. Para cuencas grandes, este factor se vuelve importante, si al tener una precipitación inicial, esta no se convierte totalmente escorrentía ya que humedece el suelo, pero si inmediatamente ocurre otra tormenta, esta se convierte totalmente en escorrentía ya que el suelo se encuentra saturado, de esta manera ocurren los picos de caudal anormales, esto es el responsable de que ocurran inundaciones en la cuenca.
- c. Lámina de agua: para cuencas pequeñas se considera constante, eso sí, dependiendo de la duración. La lámina de agua se vuelve importante en cuencas medianas, donde con una tormenta de distribución adimensional elegida, se puede desarrollar un hietograma.
- d. Frecuencia de lluvia: usualmente, en cuanto mayor es la lámina de agua de la tormenta, menos frecuente es su ocurrencia. La frecuencia de lluvia va relacionada con el tiempo de retorno, ya que este se evalúa en cierto tiempo y depende de la importancia de la estructura.
- e. Distribución temporal: esta tiene un campo importante en cuencas de tamaño medio, ya que, según una lámina de agua dada y una duración, la elección de la distribución temporal de lluvia adimensional permite el desarrollo del hietograma. Si se tiene una distribución temporal uniforme, la respuesta de la cuenca será lenta, y con picos bajos, en cambio, con una distribución no uniforme, esta producirá una respuesta rápida, y con picos altos. Durante el moldeamiento, una buena elección de la distribución temporal, podrá calcular picos, de los cuales se puede confiar.
- f. Distribución espacial: depende del tamaño de la tormenta ya que, si esta cubre un área grande, tiende a tener forma ovalada, y con un ojo donde se concentra toda la intensidad de la lluvia. En cuencas grandes, las tormentas de alta intensidad y de poca duración son muy comunes, pero

cubren una parte de estas. Mientras que tormentas de larga duración y de poca intensidad cubren casi toda la cuenca, pero en general, para cuencas grandes, lo que causa escorrentía superficial y provoca inundaciones son las tormentas de alta intensidad.

- g. Corrección del área: en la atmósfera se encuentra cierta humedad en el aire y esta puede precipitar, al hacerlo cubre cierta área, por ende, entre mayor sea el área de cobertura de la tormenta menor es la lámina de agua promedio de la tormenta e inversamente, entre menor es el área, mayor es la altura de la lámina de agua. Para determinar esta variación, se establece una relación, la cual determina cuánta agua cae por unidad de área.

#### 1.4.3.2 Abstracciones hidrológicas

Se les denomina a los procesos físicos que disminuyen la precipitación total a una precipitación efectiva o escorrentía superficial. Los procesos físicos, de los cuales se estudian en ingeniería son: a. interceptación, b. infiltración, c. almacenamiento superficial, d. evaporación de cuerpos de agua y e. evapotranspiración. Los principales objetivos del modelamiento hidrológico toman estos factores hidrológicos, para obtener unos resultados efectivos. Algunos modelos, dan como objetivo hallar la infiltración.

- a. Interceptación: es de gran relevancia en la modelación de tormentas de baja y alta intensidad. Normalmente, si una tormenta tiene alta frecuencia de ocurrencia, es susceptible por la interceptación. En cambio, las tormentas de alta intensidad, pero con baja frecuencia, la interceptación es casi nula en comparación con el total de la lluvia. El modelamiento de la interceptación la toma adecuadamente los modelos de proceso continuo, pero en la modelación por eventos aislados, la interceptación es baja comparada con la infiltración.
- b. Infiltración: esta es primordial en los modelos de eventos aislados, esta define en su mayoría la escorrentía superficial. Los valores de la infiltración van en función del tiempo y el espacio, lo cual hace que su modelación sea muy compleja. Para cuencas grandes, los modelos de infiltración se basan en el concepto del índice de infiltración, donde congrega los datos de infiltración en el tiempo y espacio.
- c. Almacenamiento superficial: el almacenamiento está directamente relacionado con la topografía de la cuenca. Por ejemplo, en cuencas pequeñas y montañosas, el almacenamiento es despreciable, pero en lugares relativamente planos, como los pantanos y ciénagas, es muy complejo, para simular el almacenamiento de superficie, se basa principalmente en modelos empíricos y conceptuales.
- d. Evaporación: este elemento se cuantifica en la presencia de lagos y reservorios, y es importante para la modelación en zonas áridas y

semiáridas, ya que involucra fuertemente al balance de agua de la cuenca.

- e. Evapotranspiración: los modelos continuos utilizan principalmente esta información. La evapotranspiración es modelada similar a la evaporación, existen diferentes métodos para calcular la evapotranspiración, como el método de Hargreaves, donde depende de la temperatura media, máxima y mínima, y la radiación solar incidente, y lo anterior dependiendo del clima de la zona y la ubicación de esta con respecto al sol. O el método de Thornthwaite, donde depende la temperatura media de la zona.

#### 1.4.3.3 Escorrentía superficial

En la modelación de escorrentía superficial hay dos maneras en la cual se desarrolla esta: a. Escorrentía de la cuenca y b. Escorrentía en el canal de corriente.

- a. Escorrentía de la cuenca: se basa en tres dimensiones, pero estas se conectan al final, en el cierre de la cuenca. Este modelamiento se basa teniendo en cuenta una aproximación distribuida o concentrada. La concentrada trata de una convolución entre el hidrograma unitario con el hietograma efectivo de la tormenta. Y la aproximación distribuida toma el flujo terrestre que utiliza técnicas de ondas de difusión o cinemáticas.
- b. Escorrentía en el canal de corriente: se analiza unidimensional. Este se realiza haciendo un camino a través de la red de la corriente, y se realiza haciendo una división de las subcuencas aguas arriba. La red se traza utilizando técnicas de tránsito hidráulico o hidrológico.

#### 1.4.4 Protocolo de modelación

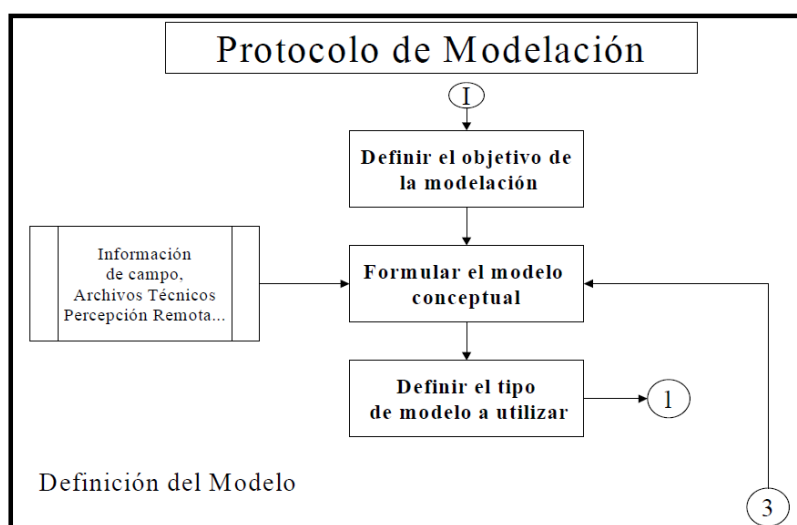
De acuerdo con Domínguez (Dominguez Calle 2000), propone un protocolo para la modelación matemática de procesos hídricos, en la Ilustración 4 e Ilustración 5 se muestran los pasos del protocolo:

1. Definición del objetivo de la modelación: en este primer paso se establece el tipo de modelo más apropiado, además de definir la precisión a trabajar. Se debe realizar ya que durante el proceso se hace necesario valorar distintas alternativas que más se ajusten a los requisitos específicos y a la información utilizable. Este punto se discute en título 1.2.
2. Formulación del modelo conceptual: con base en lo anterior, se puede entonces determinar la complejidad de los procedimientos y depende del objetivo del usuario. También se plantea distintos elementos principales y las restricciones que se tienen técnicamente. Se discute a lo largo del documento al tener ciertas consideraciones, la caracterización de las cuencas se realiza en el capítulo 2 donde se encuentran las limitaciones de estas, además de incluir las distintas restricciones de los periodos (2.1.3.2.1, 2.2.3.2.1 y Anexo 1), la calidad de la información del caudal (2.1.3.5, 2.2.3.5 y Anexo 1), cálculo

de ETo (1.8.1.3.4, 2.1.3.3, 2.2.3.3 y Anexo 1) y precipitación media de la cuenca (1.8.1.3.2, 2.1.3.2.2, 2.2.3.2.2 y Anexo 1).

3. Selección del tipo de modelo a utilizar: de acuerdo con el objetivo, se escoge el tipo de modelo. Los modelos seleccionados fueron Sacramento y AWBM y son descritos en el título 3.
4. Selección de código a utilizar: este se debe programar para facilitar el trabajo y se puede encontrar de forma libre o de venta. De tener uno o varios Software se toma el más conveniente para el análisis, pero si de lo contrario no se dispone, se debe desarrollar el código. Este no es el caso, donde el programa rrl rainfall runoff library contiene los dos modelos (1.8.2.2).

Ilustración 4 Primera etapa del protocolo de modelación

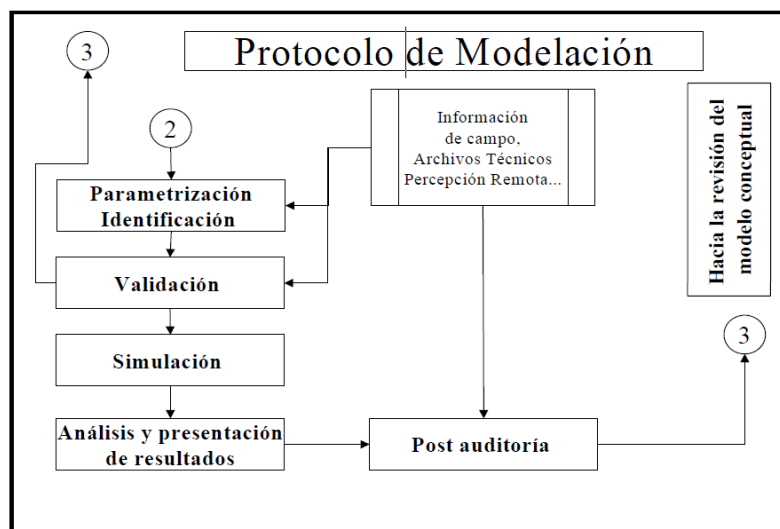


Fuente: (Dominguez Calle 2000)

5. Calibración o identificación del modelo: Ponce discute sobre el tema aplicado al proyecto (Ponce 1989), afirma que la calibración del modelo es el proceso en donde distintos parámetros del modelo son reconocidos para su uso. Radica en la manipulación de datos de lluvia-escorrentía y una táctica para reconocer los parámetros del modelo en el cual suministren la mejor coherencia entre los flujos simulados y los datos registrados. Para realizar la calibración, implica la existencia de datos de caudales en cierto punto de la cuenca, pero en cuencas de las cuales no se tenga esta medida, simplemente no se puede calibrar. La repercusión de la calibración varía según el tipo de modelo. En un modelo determinístico es de carácter predictivo, y por ende este requiere poca o ninguna calibración. En la práctica, los modelos determinísticos requieren frecuentemente cierta calibración. En la modelación conceptual, la calibración es de carácter obligatorio, ya que sus parámetros no tienen relación directa con procesos físicos, por ende, la calibración es requerida para determinar valores

apropiados. La estimación de valores en los modelos conceptuales, son meramente basados en la experiencia, utilizado en vez de la calibración, pero la estimación es riesgosa, ya que se pueden cometer errores. La calibración también tiene gran importancia en los modelos empíricos. Su identificación viene dada en el capítulo 4, con la información ingresada a los modelos y sus respectivos resultados en el Anexo 2.

Ilustración 5 Tercera etapa del protocolo de modelación



Fuente: (Dominguez Calle 2000)

6. Validación del modelo: según Domínguez (Dominguez Calle 2000) este procedimiento consiste en tantear el rango de ajuste del modelo, ya que se parametriza con una cantidad de información, luego se prueba con datos que no fueron utilizados en la parametrización, y se observa el error promedio del modelo. Si este error es tolerable dentro del rango, se considera que este se encuentra validado, de lo contrario se repite el proceso de calibración. Se ejecuta en el capítulo 4, con la información ingresada a los modelos y sus respectivos resultados en el Anexo 2.
7. Simulación: ya con el modelo validado se puede realizar la simulación según las condiciones planteadas al modelo, y únicamente sobra comparar que los parámetros e hipótesis se vean manifestados en los resultados. Se desarrolla en el capítulo 5, con los archivos ingresados a los modelos y sus productos en el Anexo 2.
8. Análisis y presentación de resultados: en esta fase se consiguen los resultados del modelo y se verifica su coherencia. Luego se procede a realizar la toma de decisiones. Se abarca a lo largo del capítulo 4 y 5, además de generarse las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

## 1.5 Estado del arte

En Colombia ha habido muchas aplicaciones de modelos hidrológicos, algunos fueron referenciados anteriormente, pero los modelos hidrológicos diarios a aplicar Sacramento y AWBM han sido poca la aplicación en el país. A continuación, se referencian algunos autores que realizaron aplicaciones de distintos modelos a cuencas en Colombia:

### 1. 1999

C. Du Fraiture, J. Rubiano, and C. Alvarez, *Uso potencial del agua en la cuenca del Rio Cabuyal, Colombia*. México D.F: Instituto Internacional del Manejo del agua, 1999. (Fraiture, Rubiano y Alvarez 1999)

Para evaluar el recurso hidrico en el punto de captación se le aplicó a la cuenca el modelo hidrológico AWBM, pero reina un inconveniente y eran los limitados datos metereologicos y de caudal en la cuenca, pero aun así aplicando el modelo, se obtiene un buen ajuste de la informacion, dando la capacidad de realizar algunas proyecciones, pero debido a la limitada información, esta proyeccion so se podria realizar no mas de tres años.

### 2. Febrero de 2007

E. Roldán and L. F. Carvajal, "Agregado Gr4J Aplicación : Cuenca Del Río Aburrá," *Dyna. Fac. Minas. Univ. Nac. sede Medellín*, vol. 74, no. 152, pp. 73–87, 2007. (Roldán y Carvajal 2007)

Durante este trabajo se buscó la eficiencia del modelo GR4J en la cuenca del rio Aburrá a 8 subcuencas del mismo, los resultados de este análisis arrojaron buenos resultados, y el modelo representa los caudales mínimos, siendo posible su aplicación en el análisis de escenarios probables.

### 3. Mayo de 2009

G. Amaya, C. Restrepo, O. David, J. Vélez, and O. Álvarez, "Modelación del comportamiento hidrológico de tres cuencas en el Urabá Antioqueño - Colombia," *Av. en Recur. Hidráulicos*, vol. 19, pp. 21–38, 2009. (Amaya et al. 2009)

Se tomó el modelo de Tanques, que es un modelo hidrológico diario, el cual fue aplicado a tres cuencas del Urabá Antioqueño, cada una con distintas características que afectan el caudal. Los resultados obtenidos de esta investigación fue un ajuste aceptable en dos de las tres cuencas, justifican es por la falta de estaciones que miden la precipitación en la zona, por lo tanto, no se tiene un valor de precipitación adecuado de la cuenca para identificarlo en el modelo.

#### 4. Julio-diciembre de 2009

J. Burbano-Girón, E. Domínguez, and A. Etter, "Modelación del efecto de escenarios de cobertura sobre la migración de nutrientes (N,  $P_2O_5$ ) en la cuenca alta del río Magdalena (Huila, Colombia)," *Ing. y Univ.*, vol. 13, no. 2, pp. 341–369, 2009. (Burbano-Girón, Domínguez y Etter 2009)

El cambio del uso del suelo en la cuenca del río Magdalena se ha vuelto una problemática, ya que debido a estos cambios, se aumentó los sedimentos que llegan al río, esto debido a actividades agrícolas y el uso de fertilizantes, por ello se implementó en la cuenca del río Magdalena, hasta el centro del departamento del Huila, alrededor de  $5\,653\text{ km}^2$  los modelos MIKE 11 y MIKE SHE derivados del Sistema Hidrológico Europeo, los cuales son modelos determinísticos y distribuidos, por lo cual requiere la topografía y características del suelo. Este modelo simuló la hidráulica del río y el flujo de las laderas para determinar los nutrientes (N,  $P_2O_5$ ) en el punto de interés. Como desenlace del trabajo se encontró un ajuste medio debido a falta de información que ayude a describir los procesos hidrológicos. También se encontró mayor cantidad de los nutrientes analizados.

#### 5. Junio de 2011

Y. L. Naranjo, "Estudio comparativo de modelos multiparamétricos de balance hídrico a nivel mensual en cuencas hidrográficas de Cundinamarca y Valle del Cauca," Pontificia Universidad Javeriana, 2011. (Naranjo 2011)

En el trabajo se aplicaron varios modelos de balance hídrico mensual en dos cuencas, una ubicada en Cundinamarca y otra en Valle del Cauca. Da como conclusión que se obtuvieron ajustes adecuados de los modelos, pero en la cuenca del río Guadalajara, ubicado en el Valle del Cauca no ajustó correctamente ningún modelo, y tres de los seis modelos aplicados se obtuvieron buenos ajustes, pero en modelos con más parámetros de ajuste, no se obtienen mejores estimaciones. El autor recomienda realizar un análisis más detallado, ya que los modelos mensuales tienen limitaciones con respecto a las variables que maneja.

#### 6. Abril de 2013

A. Kaune, "Surface water assessment and water supply reliability: Pamplonita Basin, Colombia and Venezuela," UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2013. (Kaune 2013)

En la parte media y baja de la cuenca del río Pamplonita hay inseguridad en el suministro de agua debido a que no se ha cuantificado adecuadamente el recurso hídrico en la cuenca, por ello se aplicó el modelo hidrológico mensual Budyko a la cuenca, este es un modelo determinístico, lo cual se aplicó con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) a la cuenca. Los resultados obtenidos



concluyeron un buen ajuste del modelo a la cuenca, y el autor recomienda que la mejor área para los cultivos se encuentra en la parte inferior de la cuenca.

#### 7. Abril de 2015

L. E. M. Forero, “Calibración de los modelos hidrológico e hidráulico para el sistema de alerta temprana para inundación por desbordamiento para la quebrada Chinguaza,” Pontificia Universidad Javeriana, 2015. (Forero 2015)

El autor aplicó una modelación a la quebrada Chinguaza, ubicada en el sur de la ciudad de Bogotá D.C. con el fin de realizar una alerta temprana para una inundación por desbordamiento. Para realizar esto, el autor utilizó el modelo SWAT, con la posibilidad de poder ajustar gran cantidad de parámetros y realizar un mejor ajuste en el comportamiento de la precipitación – escorrentía, y con un intervalo de tiempo no menor que una escala diaria. Al realizar la calibración, se validaron los distintos parámetros hallados, obteniendo un muy buen ajuste.

#### 8. Noviembre de 2016

Y. Castañeda, “Modelación del efecto del cambio de uso del suelo en la cuenca del Rio Coello, bajo escenario de cambio climático, a través de la aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and WaterAssessmentTool),” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016. (Castañeda 2016)

Con el fin de evaluar el cambio hidrológico que pueda tener la cuenca a futuro en consecuencia del cambio del uso del suelo, se aplicó a la cuenca del río Coello el modelo hidrológico SWAT, en el cual se establecieron distintos escenarios, con el fin de proyectar el recurso hídrico obtenido a futuro teniendo en cuenta el cambio del uso del suelo. Los resultados del modelo fueron los esperados, y se obtuvo un ajuste en la validación muy buena.

#### 9. Septiembre de 2018

N. Duque, C. Vega, D. Zamora, E. Rodríguez, and P. Arboleda-Obando, “Multi-Structure Hydrological Ensemble to Improve Flow Daily Prediction in the Sumapaz River Basin, Colombia,” *Epic Ser. Eng.*, vol. 3, pp. 62–69, 2018. (Duque et al. 2018)

Es esencial la aplicación de varios modelos hidrológicos a cuencas, con el objetivo de destacar la incertidumbre entre cada modelo, este trabajo utiliza 12 modelos, (se encuentran los modelos estudiados en este trabajo) entre los datos observados. El estudio utiliza el método de Bayesian Model Averaging (BMA) para el análisis de incertidumbre entre los modelos. Los modelos fueron aplicados a la cuenca del río Sumapaz, obteniendo un mejor rendimiento al aplicar el método BMA.

## **1.6 Marco conceptual**

### **ArcGIS**

Es un software el cual es un conjunto de programas de los Sistemas de Información Geográficos (SIG), producido y comercializado por ESRI, en la cual se pueden realizar aplicaciones de análisis, diseño, tratamiento, captura y publicación de información geográfica. (ESRI [sin fecha])

### **Archivo Shapefile**

Este formato incluye “ubicación geográfica y la información de atributos de las entidades geográficas”, estos se pueden representar de distintas maneras, como puntos, líneas o figuras geométricas. (ArcGIS for Desktop 2016)

### **Brillo solar**

Es otra manera de conocer la radiación solar “es a través de la medición de horas de sol efectivo del día (brillo solar o insolación)”(Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 2017) está relacionado con la suma de tiempo el cual el sol directo irradia la superficie. El instrumento de medición es el heliógrafo y este marca sobre una cartulina especial a una potencia superior a los  $120 \text{ W/m}^2$ . (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 2017)

### **Balance hídrico**

Esencialmente es la “comparación entre los aportes y las pérdidas de agua” en un lugar y periodo específico. Los aportes son la precipitación, agua subterránea u otros, los egresos son la evapotranspiración, infiltraciones y salida de la cuenca. (Cuesta y Spanjersberg [sin fecha])

### **Caudal**

Este concierne “al volumen de agua que pasa por la sección de aforos en la unidad de tiempo” este se formula en metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). (IDEAM 2007)

### **Ciclo hidrológico**

Éste no tiene ni un principio ni un fin, ya que se repite de manera simultánea. Este involucra las distintas fuentes de agua, como océanos, ríos y lagunas, con la energía del sol, el agua se evapora y permanece en la atmosfera, donde con la acumulación de este produce nubes, cuando crecen estas caen en forma de precipitación en el océano o en la superficie terrestre. Esta agua que precipita puede caer en forma líquida o se acumula en capas de hielo, después fluye sobre la superficie en forma de escorrentía superficial, subterránea o ser interceptada por las plantas para luego descargar en los ríos como escorrentía superficial. La gran mayoría del agua

precipitada vuelve al océano, la parte que no lo hace, se evapora nuevamente sobre la superficie terrestre. (Chow, Maidment y Mays 1994)

## **Cuenca**

Es una superficie que transporta agua a partes bajas por medio de un sistema de drenaje, la cual desciende hasta otra cuenca aledaña o al océano. (Breña Puyol y Jacobo Villa 2006)

## **Digital Elevation Model (DEM)**

En español se traduce como modelos de elevación digital, estos archivos consisten en una representación digital de un terreno, para poder administrarlos y analizarlos con programas de los sistemas de información geográfica. (Informática hoy 2016)

## **Escorrentía**

Citando a Ven Te Chow (Chow, Maidment y Mays 1994) dice “la escorrentía superficial es aquella parte de la lluvia que no es absorbida por el suelo mediante la infiltración”, esta se produce cuando la lluvia supera la capacidad de infiltración del suelo, además “consideró que la escorrentía superficial tomaba la forma de un flujo en láminas” y que se podría medir su profundidad en fracciones de longitud. “A medida que el flujo se acumulaba moviéndose a lo largo de la pendiente, su profundidad aumentaba hasta que descargaba en un canal” estos son los distintos medios hidráulicos en que el agua se transporta, como riachuelos, quebradas, ríos, lagunas, pantanos, etc.

## **Evaporación**

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (Allen et al. 2006) “Proceso en el cual el agua se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie”. Este proceso se lleva a cabo en diferentes superficies y es necesario la aplicación de energía, esta se obtiene de la radiación solar y en menor nivel la temperatura, el agua es transportada en función de la humedad atmosférica y la velocidad del viento. (Allen et al. 2006)

## **Evapotranspiración**

En pocas palabras dicho por Ven Te Chow (Chow, Maidment y Mays 1994) “es la combinación de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación”.

## **Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)**

Esta corresponde a la evapotranspiración de un cultivo hipotético de referencia, la FAO (Allen et al. 2006) define la superficie de referencia como una superficie de

pasto “con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de  $70 \text{ m s}^{-1}$  y un albedo de 0.23. La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sobra totalmente al suelo. La resistencia superficial fija de  $70 \text{ m s}^{-1}$  implica un suelo moderadamente seco que recibe riego con una frecuencia semanal aproximadamente”.

Para el cálculo de este valor es necesario datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento.

## **Hidrología**

Es el estudio del agua en la superficie de la tierra, donde involucra las variaciones del espacio y de tiempo en el espacio hídrico global, con el fin de obtener el movimiento del agua bajo y sobre la superficie terrestre afectada por las características físicas, químicas y biológicas del sitio. (Breña Puyol y Jacobo Villa 2006)

## **Humedad Relativa**

El agua está presente en cualquier parte de la atmosfera, es llevada por procesos de evaporación y transpiración, es invisible, pero al condensarse en grandes cantidades forman nubes y luego cae nuevamente a la superficie. “La humedad relativa es la relación porcentual entre la masa de vapor contenida actualmente en un volumen de aire y la que tendría el mismo volumen si estuviese saturado a la misma temperatura”(Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 2017) por tanto los resultados de este se dan en porcentaje (%).

## **Polígonos de Thiessen**

Se define según Ven te Chow (Chow, Maidment y Mays 1994) como el área efectiva de cada punto con una “correspondiente área de aplicación en una red de polígonos de Thiessen, cuyas fronteras están formadas por los bisectores perpendiculares a las líneas que unen los puntos adyacentes”. Para determinar la precipitación media de la cuenca se determina una cantidad “J de pluviómetros y el área de la cuenca que se asigna a cada uno de ellos es  $A_j$  y  $P_j$  es la lluvia registrada en el pluviómetro j-ésimo” (Chow, Maidment y Mays 1994) la precipitación media de la cuenca sobre el área es dada por la ecuación (1):

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^J A_j P_j \quad (1)$$

## **Precipitación**

Según Ven Te Chow (Chow, Maidment y Mays 1994) es “la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense”, en la precipitación se incluye todos los procesos en la cual cae agua a la superficie, como la lluvia, el granizo, la nieve y nevisca.

## **Rainfal runoff library (rrl)**

Este es un programa creado por eWater, el software es libre, es una herramienta para la modelación de escorrentía superficial que utiliza datos diarios de lluvia, evapotranspiración y caudal, es capaz de realizar calibración, verificación y simulación de distintos modelos hidrológicos, entre ellos se encuentran los dos modelos a implementar en la ejecución del trabajo, los modelos Sacramento y AWBM. (eWater Toolkit [sin fecha])

## **Raster**

ESRI (ESRI 2016) lo define como “una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información” la información que puede almacenar es muy variada para múltiples usos. (ESRI 2016)

## **Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) “permite relacionar cualquier dato con una localización geográfica” (Ministerio de Educación Nacional de Colombia [sin fecha]) con esto da la facilidad de poder administrar datos geográficos de forma fácil, entendible y accesible. Los SIG son utilizados como herramienta en la búsqueda de soluciones en el aspecto geográfico, como división territorial, información cartográfica, investigación científica, en arqueología, historia, ingeniería, entre otros campos.

## **Transpiración**

Es la vaporización del agua contenida en las plantas, las cuales pierden el agua a través de estomas. El agua es tomada desde las raíces con ciertos nutrientes que son transportados a lo largo de la planta. Igual que en la evaporación, el cambio de estado está en función de la radiación solar, la temperatura y su transporte de la humedad atmosférica y la velocidad del viento. (Allen et al. 2006)

## **Viento**

Simplemente “es el aire en movimiento”(Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 2017), se mide con vectores, de este se compone del movimiento horizontal como vertical el cual es la dirección del vector, mientras

su magnitud es la distancia que recorre una partícula de aire en unidad de tiempo, esta se mide en metros por segundo ( $m/s$ ), kilómetros por hora ( $km/h$ ) o nudos. (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 2017)

## **1.7 Alcances y limitaciones**

### **1.7.1 Alcances**

Por medio de distintas estaciones pluviométricas, climáticas y limnimétricas, además de los modelos postulados, se ejecutó la parametrización de los distintos elementos que componen cada modelo en distintos fenómenos climáticos, para ello se seleccionaron estaciones que alberguen la mayor cantidad de información, dependiendo un análisis de datos disponibles, establecer los distintos periodos para la ejecución de la calibración y validación de los modelos, para concluir como fue su ajuste por medio del coeficiente de Nash-Sutcliffe y su posible aplicación en otras cuencas del país.

Una vez realizado lo anterior, se efectuará una visita técnica en puntos de captación de agua, identificando la cuenca, así mismo el recurso hídrico que toman en estos puntos, para concluir el comportamiento del caudal en las temporadas de déficit de lluvias o en crecientes con los parámetros calibrados en cada modelo.

### **1.7.2 Limitaciones**

Los periodos de calibración y validación de los modelos estará en función principalmente de la disponibilidad de datos pluviométricos, climáticos y limnimétricos, si faltan datos limnimétricos son imposibles de estimar, ya que esto va en función de la precipitación y parámetros climáticos que ocurrieron durante el día faltante, (es el objetivo de este trabajo) sumado a esto la calidad de la información registrada debe ser suficiente para obtener un ajuste suficiente, por tanto los periodos los cuales se escojan podría estar dividido por lapsos de tiempo en los cuales falten bastantes datos o la calidad de los datos no se adapte adecuadamente a los modelos.

## **1.8 Metodología**

La metodología se trabajó se definió en torno al desarrollo y cumplimiento de los objetivos específicos de la siguiente manera:

### **1.8.1 Identificación de las características hidrológicas, meteorológicas, morfológicas, fisiográficas y ambientales de las cuencas de estudio.**

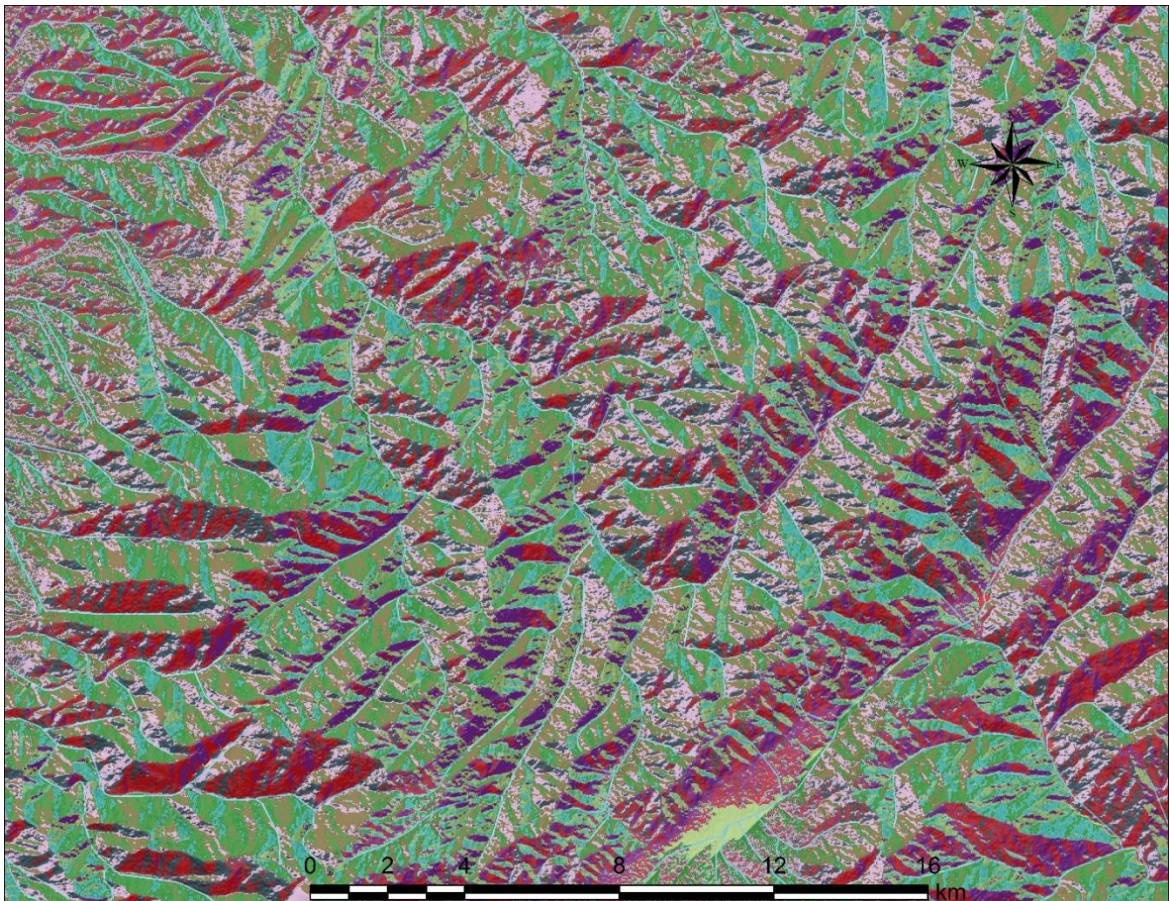
Los resultados de estos análisis se muestran en el Anexo 1, donde se encuentra ordenado por cuenca, incluyendo entre archivos shapefile procesados y mostrados en el trabajo, también incluye los diferentes cálculos para precipitación, evapotranspiración de referencia y caudal mostrados a lo largo del documento.

#### 1.8.1.1 Características morfológicas

Utilizando el software ArcGIS 10.5 se procede con las siguientes herramientas incluidas dentro del software:

1. **Descarga de archivos DEM:** fue tomado de la página <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>, esta es administrada por University of Alaska Fairbanks, la cual dispone del servicio de Alaska Satellite Facility (ASF), la cual procesa, archiva y distribuye datos de teledetección alrededor del mundo, los cuales son accesibles a cualquier persona. (Alaska Satellite Facility 2019) La información necesaria la contiene el satélite ALOS PALSAR, este satélite es de origen japonés, su operación estuvo entre los años 2006 y 2011, donde tomo imágenes con su radar PALSAR en terrenos de todo el mundo. (GeoSpatial 2013)
2. **Fill:** esta herramienta corrige datos erróneos del archivo además de completar datos faltantes de la topografía, con el fin de evitar errores en los demás procesos.

Ilustración 6 Dirección de flujo en el área circundante a la cuenca del río Ceibas

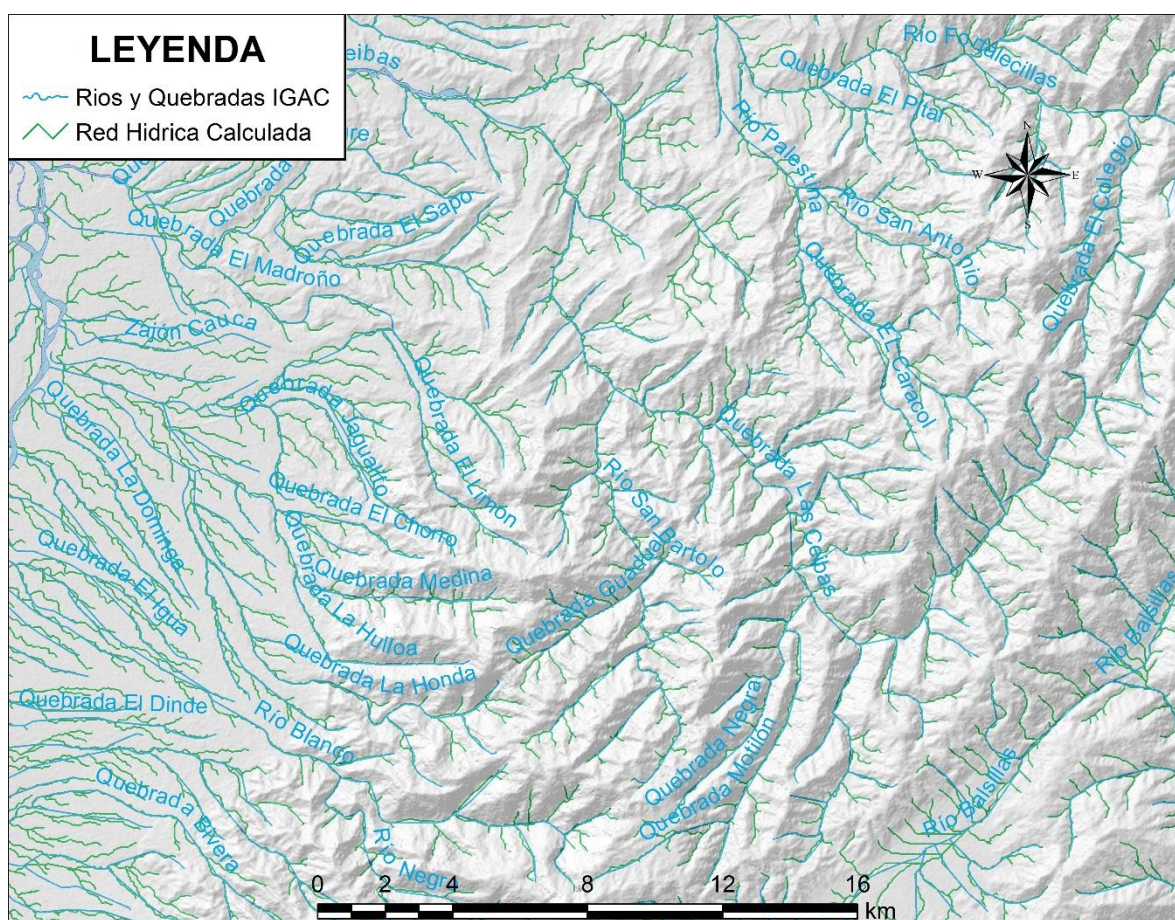


Fuente: Propia



3. **Flow direction:** este proceso detecta por medio de vectores la dirección que toma el agua al caer en la superficie dependiendo de la topografía, para ejemplificar este procedimiento se muestra la cuenca del río Ceibas, donde las características son más notables, en la Ilustración 6 está la dirección de flujo en áreas circundantes a la cuenca, aunque no se representan en vectores al ser demasiado diminutos para poderlos ver a simple vista, si no en 8 colores representados por 8 distintas direcciones en los que el programa considera se puede mover el agua.
4. **Flow acumulation:** se analiza con el resultado de Flow direction y dice la acumulación de flujo en la superficie, resumidamente con esta función es posible hallar los ríos, las quebradas y afluentes intermitentes que probablemente estén en la zona.

Ilustración 7 Red hídrica obtenida de los alrededores de la cuenca del río Ceibas



Fuente: Propia

5. **Raster calculator:** al procesar el raster efecto de aplicar Flow acumulation y por medio de una relación aproximada al orden de Horton, se calculan los



afluentes sobre la superficie procesada, con el fin de poner de manera precisa el punto de cierre de cuenca sobre el efluente para un correcto procesamiento de la información geográfica. Los puntos escogidos se basaron según las estaciones limnimétricas identificadas en cada cuenca con un shapefile realizado por el IDEAM con la ubicación de las estaciones. En la Ilustración 7 se compara los ríos y quebradas que figuran en la base de datos abiertos del IGAC, en esta aparece la red hídrica del país a una escala 1:100.000, esta de color azul, mientras que la red hídrica calculada con el raster proveniente de satélite ALOS PALSAR de color verde la cual es bastante similar, concluyendo la efectividad de este proceso.

6. **Watershed:** recurriendo al resultado de la dirección de flujo y el punto identificado previamente en un shapefile, se obtiene finalmente la cuenca delimitada. Para finalizar se convierte el archivo a tipo shapefile con el fin de procesar su área, perímetro y ocuparlo para las demás caracterizaciones geográficas.

A partir de la cuenca generada anteriormente se calculan distintos parámetros que definen cuantitativa y cualitativamente la cuenca tomando como referencia bibliografía como el libro Hidrología Aplicada de Ven Te Chow (Chow, Maidment y Mays 1994) y el artículo Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas de Benjamín Lux (Lux 2014).

#### 1.8.1.2 Características hidrológicas

Con ayuda de los SIG, al tener la cuenca delimitada y con un shapefile de ríos de origen del IGAC, se determinan los distintos ríos que componen la cuenca, complementando con una breve descripción de estos.

#### 1.8.1.3 Características meteorológicas

Teniendo en cuenta estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se solicita información diaria de 49 estaciones meteorológicas de ambas cuencas.

##### 1.8.1.3.1 Disponibilidad de información

Al disponer de esta gran cantidad de información se realizó un análisis de datos disponibles, descartando estaciones con información nula, periodos de tiempo que no se podrán analizar y precisar mejor la administración de los distintos periodos destinados a la modelación. Para identificar la cantidad de datos que se tienen disponibles para calibrar y validar la información se ordenan todos los datos de temperatura mínima, media y máxima, precipitación y caudal de la siguiente manera en Microsoft Excel:

- Columna 1: Año.
- Columna 2: Mes.
- Columna 3 – 33: datos desde el día 1 al 31.
- Columna 34: Vacío.
- Columna 35: la siguiente formula: =SI(O(B1=1,B1=3,B1=5,B1=7,B1=8,B1=10,B1=12),CONTAR.BLANCO(C1:AG1),SI(O(B1=4,B1=6,B1=9,B1=11),CONTAR.BLANCO(C1:AF1),CONTAR.BLANCO(C1:AD1))). Esta fórmula lo que hace es contar los valores que se encuentran en blanco según el número del mes.

Luego de esto se hace un semáforo para evaluar la cantidad de datos disponibles según las siguientes reglas:

- El color verde indica entre 0 y 10 datos faltantes.
- El color amarillo entre 11 y 20.
- El color rojo va entre 21 y 30 datos faltantes.
- El color negro es nula información registrada.
- El color blanco se reconoce que la estación no ha sido instalada.

Luego de esto se adjunta la información resultante de las estaciones en una misma hoja, donde cada fila identifica a una estación, mientras que cada columna empareja con un mes.

#### 1.8.1.3.2 Precipitación

1. **Polígonos de Thiessen:** Basándose de ArcGIS, donde se halla los polígonos de Thiessen de las estaciones dentro de la cuenca con la herramienta **Create Thiessen Poligons**, y se calcula el área del polígono de cada estación y su respectiva área de influencia.
2. **Relleno de información faltante:** para este se toma en cuenta la teoría de la precipitación media de la cuenca con polígonos de Thiessen. Para facilitar el procesamiento de la información se plantea un código en Visual Basic, la cual cumple con las siguientes condiciones:
  - a. Para que se pueda reemplazar un dato es necesario que el mes cuente con por lo menos el 20% de la información, en caso contrario no se realiza.
  - b. El cálculo del dato a reemplazar no considera los datos faltantes en otras estaciones ni tampoco su área respectiva, únicamente si el dato del mismo día a rellenar en la estación se encuentra, se tiene en cuenta el área, así el dato sea 0.
  - c. No se considera el día 29 de febrero presente en los años bisiestos, no cuenta con ningún problema a la hora de ejecutarlo en procedimientos posteriores.
  - d. Para facilitar el procesamiento, las estaciones se representan en una hoja diferente cada una, además de estar ordenadas alfabéticamente.

- e. Cada estación cuenta con una hoja con el mismo nombre añadido "Editado" con el objetivo de que el código copie los datos existentes en esta hoja con los datos nuevos calculados.
- f. El contenido de cada hoja contiene una estación y cuenta con el siguiente formato:
  - Columna 1: Año
  - Columna 2: Mes
  - Columna 3 – 33: Datos de precipitación
  - Columna 34: Vacío
  - Columna 35: se encuentra la siguiente formula:  
 =SI(O(B1=1,B1=3,B1=5,B1=7,B1=8,B1=10,B1=12),CONTAR.BLANCO(C1:AG1),SI(O(B1=4,B1=6,B1=9,B1=11),CONTAR.BLANCO(C1:AF1),CONTAR.BLANCO(C1:AD1))). La cual cuenta cuantos datos se encuentran en blanco con respecto al mes.
- g. Al iniciar el proceso, con condicionales selecciona el máximo de datos faltantes que pueda tener y lo compara con los presentes hallados con el numeral g.

Para esto se genera un código de programación en Visual Basic que cumple con estas condiciones, este se presenta en la Ilustración 8. Este algoritmo funciona para la cuenca del río Coello, para el río Ceibas es necesario modificar los límites del bucle que recorre las hojas con los datos de las estaciones.

Ilustración 8 Código de programación para relleno de información de precipitación

```

1 Sub Relleno_datos()
2 Application.ScreenUpdating = False 'Agilizar el código desactivando la interfaz grafica
3 Dim suma As Double 'Inicializa suma la cual es el divisor
4 Dim div As Double 'Inicializa div la cual es el dividendo
5 Dim valor As Double 'Inicializa valor la cual es el dato calculado para reemplazo
6 Dim mes As Double 'Inicializa mes donde se asignará cual mes corresponde
7 Dim areas(23) As Double 'Matriz donde se alojara las areas
8 Sheets("Areas").Select 'En una hoja se tienen las areas de cada estación
9 For i = 1 To 23 'Asigna a una matriz el valor de cada area
10 areas(i) = Cells(i, 2)
11 Next i
12 For i = 1 To 23 'Este bucle recorre cada una de las hojas en las cuales contiene los datos
13 For m = 1 To 396 'Recorre cada uno de los meses
14 Worksheets(i).Select
15 mes = Cells(m, 2).Value 'Asigna a esta variable el mes en el que se encuentra
16 'Con los siguientes 3 condicionales asigna el valor según corresponda al mes a las variables
17 If ((mes = 1) Or (mes = 3) Or (mes = 5) Or (mes = 7) Or (mes = 8) Or (mes = 10) Or (mes = 12)) Then
18 e = 25 'Corresponde al 80% de los 31 días en meses correspondientes
19 f = 33 'Fin del bucle que recorre los días del mes
20 End If
21 If ((mes = 4) Or (mes = 6) Or (mes = 9) Or (mes = 11)) Then
22 e = 24
23 f = 32
24 End If
25 If (mes = 2) Then
26 e = 22
27 f = 30
28 End If
29 If (Cells(m, 35) < e) Then 'Compara si los datos faltantes son menores al 80% de los días del mes
30 Worksheets(i + 24).Select
31 Cells(m, 3).Value = "Si" 'En la hoja donde copia los datos, reemplaza en la celda "Si"
32 For n = 3 To f 'Bucle que recorre los días del mes
33 Worksheets(i).Select
34 If IsEmpty(Cells(m, n)) Then
35 For o = 1 To 23 'Recorre cada hoja
36 Worksheets(o).Select
37 Cells(m, n).Select
38 If IsEmpty(Cells(m, n)) Then
39 Else
40 'Si la celda tiene información recolecta la información necesaria en la variable correspondiente
41 suma = suma + Cells(m, n) * areas(o)

```

```

42         suma = suma + Cells(m, n) * areas(o)
43         div = div + areas(o)
44     End If
45 Next o
46 'Asigna en la hoja correspondiente a cada estación el dato calculado
47 Worksheets(i + 24).Select
48 valor = suma / div
49 Cells(m, n + 1).Value = valor
50 suma = 0 'Inicia las variables a 0
51 div = 0
52 Else
53     'Si el dato se encuentra, solo copia el dato
54     Worksheets(i + 24).Cells(m, n + 1).Value = Worksheets(i).Cells(m, n).Value
55 End If
56 Next n
57 Else
58     Worksheets(i + 24).Select 'Si el mes no es apto para relleno, entonces asigne "No" y no realiza ningun reemplazo
59     Cells(m, 3).Value = "No"
60 End If
61 Next m
62 Next i
63 Application.ScreenUpdating = True 'Vuelve a activar la interfaz grafica
64 End Sub

```

Fuente: Propia

3. **Precipitación media de la cuenca:** se aplica la misma teoría para calcular la precipitación media de la cuenca diarias, para ello el código debe cumplir con los siguientes requisitos:

- En una hoja nueva, pegar los datos de precipitación media por cada día.
- Las estaciones en la cual no se tiene dato, no se debe considerar el área.

Con lo anterior, se crea el código en Visual Basic mostrado en la Ilustración 9 que cumple con estas condiciones. Igual que el algoritmo anterior este funciona para la cuenca del rio Coello, y para Ceibas hay que modificarlo de la misma manera.

Ilustración 9 Código de programación para cálculo de precipitación media de la cuenca

```

1 Sub Prec_med()
2     Application.ScreenUpdating = False 'Agilizar el codigo desactivando la interfaz grafica
3     Dim suma As Double 'Inicializa suma la cual es el divisor
4     Dim div As Double 'Inicializa div la cual es el dividendo
5     Dim valor As Double 'Inicializa valor la cual es el dato calculado para reemplazo
6     Dim mes As Double 'Inicializa mes donde se asignará cual mes corresponde
7     Dim areas(23) As Double 'Matriz donde se alojaran las areas
8     Sheets("Areas").Select 'En una hoja se tienen las areas de cada estación
9     comp = False
10    For i = 1 To 23 'Asigna a una matriz el valor de cada area
11        areas(i) = Cells(i, 2)
12    Next i
13    For i = 1 To 396 'Recorre cada una de las filas
14        Worksheets(48).Select
15        mes = Cells(i, 2).Value 'Lee en la hoja donde se almacena la información el mes a calcular
16        If ((mes = 1) Or (mes = 3) Or (mes = 5) Or (mes = 7) Or (mes = 8) Or (mes = 10) Or (mes = 12)) Then
17            f = 34 'Fin del bucle que recorre los dias del mes
18        End If
19        If ((mes = 4) Or (mes = 6) Or (mes = 9) Or (mes = 11)) Then
20            f = 33
21        End If
22        If (mes = 2) Then
23            f = 31
24        End If
25        For j = 4 To f 'Inicio de bucle que recorre los dias del mes
26            For k = 25 To 47 'Bucle que recorre las hojas donde se encuentra la información rellena
27                Worksheets(k).Select
28                If (IsEmpty(Cells(i, j))) Then 'Condicional el cual controla que en celdas donde no hay datos no sume el area
29                    suma = suma + Cells(i, j) * areas(k - 24)
30                    div = div + areas(k - 24)
31                End If
32            Next k
33            Worksheets(48).Select 'Selecciona la hoja donde pegará los datos
34            valor = suma / div
35            'Pega el dato de precipitacion en el dia j del mes i
36            Cells(i, j - 1).Value = Application.WorksheetFunction.Round(valor, 2)
37            suma = 0 'Reinicia los valores para el nuevo calculo
38            div = 0
39        Next j
40    Next i
41 End Sub

```

```

42 Next i
43 Application.ScreenUpdating = True 'Vuelve a activar la interfaz grafica
44 End Sub

```

Fuente: Propia

4. **Identificación del comportamiento de la precipitación:** este proceso cambia según la cuenca, para el río Coello se procede con lo siguiente:

Al contar con 23 estaciones dentro de la cuenca y 8 estaciones fuera de la cuenca, se realiza el siguiente procedimiento para cálculo de mapas de isoyetas de precipitación de la cuenca:

- a. Se saca la precipitación mensual media para cada uno de los meses de cada estación si cuenta con todos los datos del mes.
- b. Se suma la precipitación que cae anualmente si en el año se cuenta con todos los datos de precipitación.
- c. Se calcula la precipitación media multianual.
- d. En una hoja Excel se suministra la siguiente información:
  - Columna 1: Código de la estación
  - Columna 2: Nombre de la estación
  - Columna 3 – 15: dato correspondiente al mes, donde la columna 3 es enero, columna 4 es febrero, etc.
  - Columna 16: precipitación media multianual
  - Columna 17: coordenada x de las estaciones según sistema de coordenadas Magna origen Bogotá
  - Columna 18: coordenada y de las estaciones según sistema de coordenadas Magna origen Bogotá
- e. En ArcGIS 10.5 se exporta la hoja de Excel a un archivo shapefile.
- f. Con la herramienta **IDW**, se realiza una interpolación entre todos los puntos en función de la distancia entre ellas.
- g. Se computa la información de cada uno de los meses y de la precipitación media multianual.
- h. Se generan los mapas de isoyetas para cada uno de los meses y la precipitación media multianual.

Para la cuenca del río Ceibas se sigue el mismo procedimiento de Coello hasta el numeral c, al tener menor cantidad de estaciones, no es factible el cálculo de mapas de isoyetas, a cambio de esto, simplemente se calcula la precipitación media mensual multianual con la teoría de polígonos de Thiessen y se realiza una gráfica.

1.8.1.3.3 Brillo solar, humedad relativa, velocidad del viento, temperatura media, máxima y mínima

El procedimiento es el mismo en todas las características del clima, se hizo para la identificación climática de las cuencas:

1. Se saca la media para cada uno de los meses de registro.
2. se ordena la información con una tabla dinámica en el siguiente orden: en las columnas están los meses y en las filas los años.
3. Se calcula la media mensual multianual de cada rasgo climático.

#### 1.8.1.3.4 Evapotranspiración de referencia

Se aplica la teoría de evapotranspiración de Penman-Monteith como evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) recomendada por la FAO (Allen et al. 2006). Este método presenta alternativas para casos de datos faltantes, dentro de los cálculos de ET<sub>o</sub> será incluido todo el relleno de datos, a excepción donde falten datos de temperatura mínima o máxima donde no se calculó la ET<sub>o</sub>, teniendo claro lo anterior se procede con el posterior procedimiento:

1. **Archivo Excel genérico para el cálculo de ET<sub>o</sub>:** se toma de referencia al documento “Evapotranspiración de cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” de la FAO (Allen et al. 2006) en el cálculo de este valor, por tanto se citan los numerales de las ecuaciones usadas del documento. Se genera un archivo en Microsoft Office Excel genérico para aplicar en cada estación programado con el posterior código para el cálculo de los distintos parámetros necesarios en el cálculo de la Evapotranspiración:

Presión media de vapor de la saturación ( $e_s$ ) (ecuación 11)

```
1 Function es(T As Double)
2 es = 0.6108 * Exp((17.27 * T) / (T + 237.3))
3 End Function
```

Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\Delta$ ) (ecuación 13)

```
1 Function Delta_a(T As Double)
2 Delta_a = 4098 * 0.6108 * Exp((17.27 * T) / (T + 237.3)) / ((T + 237.3) ^ 2)
3 End Function
```

Radiación solar en un día despejado ( $R_{so}$ ) (ecuación 36)

```
4 Function Rso_FAO(z, Ra)
1 Rso_FAO = (0.75 + (0.00002) * z) * Ra
2 End Function
```

Constante Psicrométrica ( $\gamma$ ) (ecuación 8)

```
1 Function Gamma_a(altitud)
2 P = 101.3 * ((293 - 0.0065 * altitud) / 293) ^ 5.26
3 Gamma_a = 0.000665 * P
4 End Function
```

### Radiación extraterrestre para periodos diarios ( $R_s$ ) (ecuación 21 - 27)

```
1 Function Ra_dia(j As Double, lat)
2 Pi = 3.141592654
3 lat = (lat * Pi) / 180
4 Decl = 0.409 * Sin(2 * Pi * j / 365 - 1.39)
5 dr = 1 + 0.033 * Cos(2 * Pi * j / 365)
6 X = 1 - ((Tan(lat)) ^ 2) * ((Tan(Decl)) ^ 2)
7 If X <= 0 Then X = 0.00001
8 ws = (Pi / 2) - Atn((-Tan(lat) * Tan(Decl)) / (X ^ 0.5))
9 Gsc = 0.082
10 Ra_dia = (24 * 60 / (Pi)) * Gsc * dr * ((ws) * Sin(lat) * Sin(Decl)
+ Cos(lat) * Cos(Decl) * (Sin(ws)))
11 If Ra_dia < 0 Then Ra_dia = 0
12 End Function
```

### Duración máxima de la insolación ( $N$ ) (ecuación 34, 25 – 27)

```
1 Function Nhoras(j, lat)
2 Pi = 4 * Atn(1)
3 lat = (lat * Pi) / 180
4 Decl = 0.409 * Sin(2 * Pi * j / 365 - 1.39)
5 dr = 1 + 0.033 * Cos(2 * Pi * j / 365)
6 X = 1 - ((Tan(lat)) ^ 2) * ((Tan(Decl)) ^ 2)
7 If X <= 0 Then X = 0.00001
8 ws = (Pi / 2) - Atn((-Tan(lat) * Tan(Decl)) / (X ^ 0.5))
9 Nhoras = (24 / Pi) * ws
10 End Function
```

### Radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ ) (ecuación 39)

```
1 Function Rnl_dia(Tmin, Tmax, ea, Rs, Rso)
2 Rnl = (0.000000004903) * (((Tmax + 273) ^ 4) + ((Tmin + 273) ^ 4))
/ 2 * (0.34 - 0.14 * ea ^ 0.5) * (1.35 * (Rs / Rso) - 0.35)
3 Rnl_dia = Rnl
4 End Function
```

### Radiación neta solar o de onda corta ( $R_{ns}$ ) (ecuación 38)

```
1 Function Rns(Rs)
2 Rns = (1 - 0.23) * Rs
3 End Function
```

Aunque son más parámetros, estos fueron formulados en Excel. Entre las ecuaciones no mostradas están las de sustituir información de brillo solar y de humedad relativa si no se encuentra con ayuda de condicionales, además de no contar con la velocidad en un día cual quiera, se reemplaza con la media mensual de la velocidad del viento calculada para la cuenca y/o la estación, según sea el caso.

2. **Reemplazo de datos:** con el archivo ya programado para hacer todas estas acciones, solo es hacer copias de este archivo y reemplazar los datos de cada estación a cada archivo, generando así la ETo.
3. **ETo media de la cuenca:** al tener abundantes estaciones climáticas de la cuenca del río Coello con un diferencial importante en la altura y ubicación, la ETo de la cuenca se tomó también por polígonos de Thiessen de estas estaciones dentro de la cuenca, tomando los valores de cada día en cada estación sin tener en cuenta los días en los cuales no se pudo calcular, obteniendo así la base de datos que será ingresada al modelo. Para ello se puede aplicar el mismo código para calcular la precipitación media de la cuenca modificando el bucle que recorre las hojas.

La cuenca del río Ceibas al contar con datos intermitentes, se consulta una estación relativamente cercana a la cuenca para proveer de información, en la ETo de la cuenca simplemente se formula un condicional para que llame el dato de la estación principal, de no encontrarse detallar el mismo dato en la estación suplente, y si tampoco se encuentra, poner el identificador “-9999”. Para suplir los datos aun faltantes, se crea un código en Visual Basic que cumpla con los siguientes propósitos:

- a. Identificar el dato faltante el cual se identifica con el valor de “-9999”.
- b. Identificar el día y el mes en el cual se encuentra el dato.
- c. Recorrer la misma fecha en todos los años de registro, recolectando datos de ETo que se encuentran, en caso de que no esté disponible no debe tomarlo.
- d. Promediar los valores de ETo encontrados, redondeándolo 2 decimales para luego reemplazarlo en la ubicación original del dato.

Con lo anterior se concluye el algoritmo de la Ilustración 10.

Ilustración 10 Código de programación para relleno de información en cuenca del río las Ceibas

```

1 Sub Reem_datos_faltantes_ETo()
2   Sheets("ETo_Med_Cuenca").Select
3   For i = 3 To 398
4     For j = 4 To 34
5       Cells(i, j).Select
6       If ActiveCell = -9999 Then
7         mes = Cells(i, 3)
8         For k = 0 To 32
9           If Cells(2 + mes + 12 * k, j) <> -9999 Then
10            suma = suma + Cells(2 + mes + 12 * k, j)
11            vez = vez + 1
12          Else
13            End If
14          Next k
15          ETomed = Application.WorksheetFunction.Round(suma / vez, 2)
16          'Una vez recolecte todos los ETo los promedia y redondea al 2° decimal
17          Cells(i, j).Value = ETomed
18          suma = 0
19          vez = 0
20        End If
21      Next j
22    Next i
23 End Sub

```

'Hoja donde se encuentra  
'Recorre los meses  
'Recorre los días  
'Si encuentra un dato faltante  
'Guarda el número del mes  
'Recolecta los datos de ETo faltantes en los 32 años de registro  
'Va de año en año en la fecha guardada  
'Acumula la ETo  
'Cuenta las veces que encuentra el dato  
'Reemplaza el dato encontrado en la celada de origen  
'Inicializa las variables para un nuevo calculo

Fuente: Propia



### 1.8.1.3.5 Caudal

Esta información será esencial para la calibración y validación del modelo, además de detallar los periodos que se realizaron los procedimientos del modelo, básicamente la aplicación de los periodos de tiempo será en función de la disponibilidad de estos datos, estos datos son imposibles de deducir de una manera correcta (es el fin del trabajo de grado) y los datos incorrectos suministrados al programa puede afectar gravemente los parámetros del modelo, por tanto no se rellena esta información. Aprovechando distinta bibliografía, se estudia el comportamiento estadístico de los datos de caudal, generando distintos gráficos y datos de los cuales se describen enseguida para debatir la calidad de la información, eliminar datos de dudosa magnitud que puedan afectar los modelos.

1. **Media:** lo define Ven te Chow como “el primero momento alrededor del origen de la variable aleatoria, una medida del punto medio” (Chow, Maidment y Mays 1994), y esta se define con la ecuación (2) :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

2. **Desviación estándar:** en la distribución promedio de los datos que tiene alrededor de la media, se define en la ecuación (3):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

3. **Percentil:** se define como “el valor de la variable a observar y que está por debajo del porcentaje que se ha dado” (Ucha 2011), este parámetro estadístico será de manejo posterior.
4. **Diagrama de bigotes:** representa la distribución de los datos a partir de la media y de los percentiles, donde los bigotes de la gráfica representan los percentiles  $P_{01}$  y  $P_{99}$  de los datos de caudal.
5. **Tabla de frecuencias:** dicho por Ven Te Chow “el rango factible de la variable aleatoria se divide en intervalos discretos, luego se cuenta el número de observaciones que cae en cada uno de los intervalos” (Chow, Maidment y Mays 1994). Al ser una cantidad considerable de datos, se emplea un algoritmo en Visual Basic cumpliendo las condiciones dadas por el autor.
6. **Histograma de frecuencias:** representa en un diagrama de barras los resultados obtenidos en la tabla de frecuencias.
7. **Hidrograma:** compara la esorrentía directa producida por la cuenca o caudal con el exceso de lluvia generado (teóricamente) uniforme sobre la cuenca a lo largo del tiempo (Chow, Maidment y Mays 1994). Esta grafica

será de utilidad para identificar que el comportamiento de la magnitud de precipitación que llega a la cuenca sea equivalente a la magnitud de la escorrentía producida.

#### 1.8.1.4 Características fisiográficas

Toda esta fase destaca por la revisión de estudios locales, departamentales y del país sobre los suelos. De esto se identificó la cuantificación que abarca en la cuenca así mismo la representación que caracteriza en ella.

1. **Estudios a detallar:** valiéndose de los SIG y algunos archivos shapefiles obtenidos de las bases de datos abiertos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), estudios generales de suelos de cada departamento, ya que el suelo influye directamente en la escorrentía superficial y será de utilidad para el diagnóstico de resultados. Los estudios abarcados serán los siguientes:
  - a. Descripción de suelos: peculiaridades presentes en el suelo, como composición mineralógica, características del suelo, origen, relieve, clima y fertilidad
  - b. Uso del suelo: este ítem busca cual es el uso actual que se le da al suelo, ya sea económico o de preservación, además da recomendaciones a las entidades gubernamentales sobre cómo utilizar el suelo en función de la descripción de los suelos para la preservación de la fauna, la flora y los recursos hídricos de la zona.
2. **Aferencia a las cuencas:** con la herramienta **Clip** de ArcGIS 10.5 se corta la influencia que tienen los estudios en la cuenca y se generan mapas buscando la distribución de estos estudios en la cuenca.
3. **Definición de estudios:** calculando el área que vincula cada ítem y con la bibliografía presente se detallan los distintos eventos encontrados en los suelos de la cuenca.

#### 1.8.1.5 Características ambientales

Los distintos parques naturales son documentados al Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) y este dispone libremente shapefiles delimitando cada parque natural, contienen información adicional como el nombre del mismo, el ente regulador. Con esto se busca determinar la línea de tiempo de la administración de reserva natural de las cuencas y el área que componen las reservas.

Además se estudia la cobertura del suelo, basándose con un estudio hecho en todo el país con la metodología de CORINE Land Cover, se definen el tipo de cobertura vegetal que tiene el suelo.

### 1.8.2 Implementación los modelos computacionales de balance hídrico diario propuestos a las cuencas y obtener los ajustes de los parámetros de los modelos de acuerdo a las características hídricas de cada cuenca.

Esta fase se considera la calibración y validación de los modelos, en ella se busca el modelo que mejor se ajuste a la cuenca, las razones gráficas y numéricas que lo justifican. Los resultados de la calibración y validación se observan en el Anexo 3, contando con las gráficas resultantes de estos procesos los cuales son descritos más adelante. Por otra parte los archivos ingresados al programa se encuentran en el Anexo 2.

#### 1.8.2.1 Identificación de modelos:

Por medio de la literatura encontrada, se estudió el funcionamiento de los modelos, los valores que asigna y los rangos de las variables, esto para ajustar el modelo de manera correcta, esto se identifica en el capítulo 3.

#### 1.8.2.2 Determinación del software

Mediante una investigación en distintas organizaciones gubernamentales e institutos educativos de todo el mundo, se identificó el software “rainfal runoff library” o rrl. Se trabajará con este programa y será una herramienta en la cual observar y examinar la calibración de los modelos, su ajuste en la verificación y concluir si es efectiva la implementación en el país.

#### 1.8.2.3 Comprensión del software

Con ayuda del manual del usuario, se aprendió el manejo del programa y comprender su funcionamiento, como el ingreso correcto de información e identificar los distintos resultados del programa. Por consiguiente, se resume el manejo del programa:

**Crear un archivo nuevo:** Para crear un nuevo archivo se sigue la ruta **File | New Project**, se abre una ventana y se ingresa la localización de la cuenca, el área de la cuenca en  $km^2$ , una breve descripción de la cuenca si lo desea, en la casilla de abajo se ingresa el valor por defecto cuando hay datos faltantes. El área es solicitada por el programa puesto que trabaja con escorrentía diaria, esto quiere decir que realiza la siguiente conversión:

$$Escorrentia \left[ \frac{mm}{s} \right] = \frac{Q[m^3/s]}{A[m^2]} * \frac{86400 s}{1 dia} * \frac{1000 mm}{1 m}$$

El programa se divide por pestañas, la cual se puede decir que esta ordenado de tal manera que sigue un paso a paso para la aplicación de un modelo.

**Selección del modelo:** En la pestaña **Model** se selecciona el modelo a aplicar, y se muestra una breve descripción del modelo con un gráfico representativo del modelo.

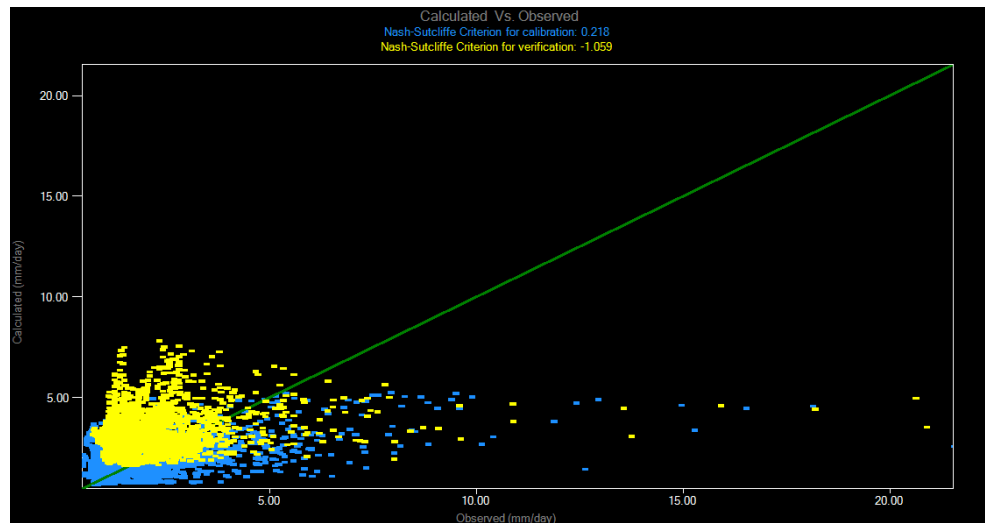
**Ingreso de datos:** En la pestaña **Input** se muestran las carpetas conectadas al programa, para conectarlas se dirige a **Tools | Options | Data Path...** y se adiciona la ruta de la carpeta que contiene los archivos. Se arrastran los archivos según lo que contengan a la casilla asignada para cada contenido y por medio del desplegable incluido en la parte lateral izquierda abajo se selecciona las unidades correspondientes.

**Periodos de calibración y validación:** La pestaña **Dates** es utilizada para asignar los periodos de calibración y verificación. Uno de los beneficios del programa es que se puede asignar un periodo para el calentamiento del modelo, con el objetivo de encontrar parámetros iniciales sobre el ajuste de los modelos y obtener una calibración más óptima y ajustada.

**Calibración:** se realiza en la pestaña **Calibration**, en esta se asigna el método de calibración del modelo y la función objetivo. En esta pestaña se encuentra también la calibración automática disponible únicamente para el modelo AWBM. En esta sección se puede manipular manualmente los parámetros del modelo, los cuales tienen características por defecto y da libre elección al usuario de manipular los topes mínimos y máximos del modelo, así mismo de dejar parámetros fijos durante la calibración. O también se encuentra la calibración manual, donde el usuario puede digitar valores según la experiencia del este con el modelo en otras cuencas. Para calibrar el modelo se pulsa el botón **Calibrate** y luego de un breve tiempo se puede observar el producto de la calibración, tanto los valores de los parámetros deducidos por el optimizador como el comportamiento del modelo durante la calibración. Para interpretar la información que concluyó el programa, se puede dirigir a la sección **Graph type** y seleccionar cualquiera de las gráficas disponibles, las cuales son:

- **Scatter Plot:** el programa compara el caudal observado con el calculado con una línea de pendiente 1, es decir que si los puntos son cercanos a esta línea, el ajuste es bueno, agregando en la parte superior el criterio de calibración de Nash-Sutcliffe tanto para la calibración como en la validación, un ejemplo de esta grafica se observa en la Grafica 1:

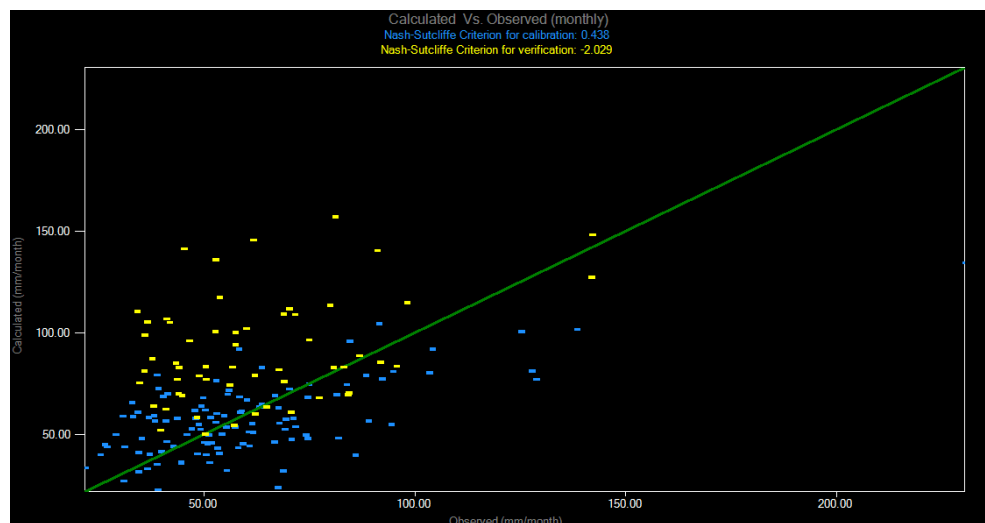
Grafica 1 Ejemplo Scatter Plot en el programa rainfall runoff library



Fuente: (Boughton et al. 2003)

- **Scatter Plot (monthly):** este plasma lo mismo que la anterior, pero un acumulado a escala mensual más el NSE para escala mensual, un ejemplo de este se encuentra en la Grafica 2:

Grafica 2 Ejemplo Scatter Plot (monthly) en el programa rainfall runoff library

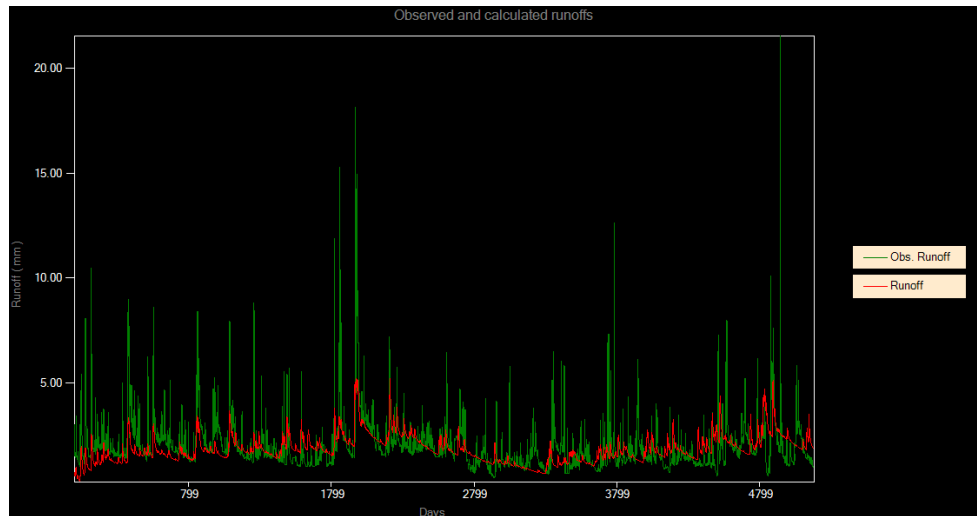


Fuente: (Boughton et al. 2003)

- **Observed and Calculated runoffs:** muestra una línea de tiempo en el eje x Vs escorrentía en el eje y, en ella están los datos observados y los datos del

modelo obtenido durante la calibración. Esta grafica se aplica tanto a la calibración como en la validación, como ejemplo esta la Grafica 3:

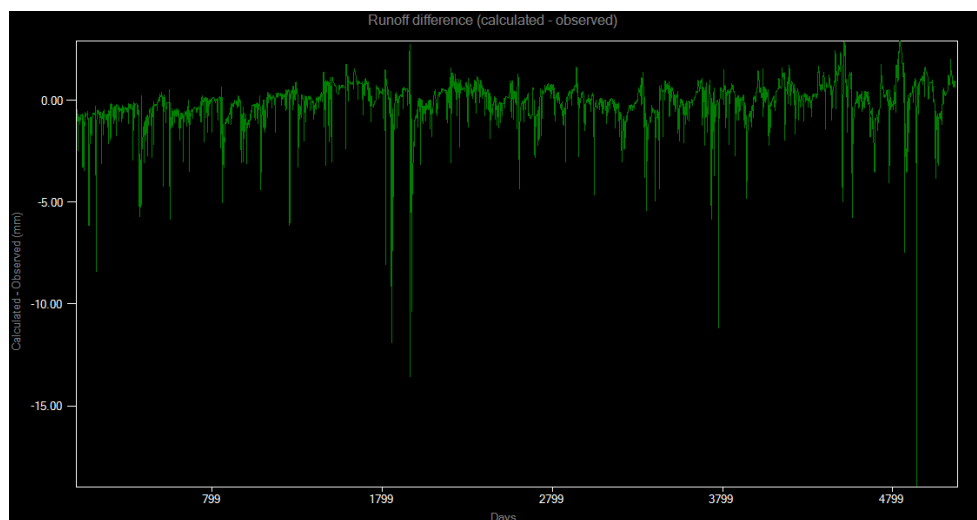
Grafica 3 Ejemplo Observed and Calculated runoffs en el programa rainfall runoff library



Fuente: (Boughton et al. 2003)

- **Difference of the runoff:** igualmente muestra una línea de tiempo en el eje x, pero en este caso el eje y muestra la diferencia de los datos calculados con los observados en la línea de tiempo. Esta grafica se aplica en la validación, un ejemplo es mostrado en la Grafica 4:

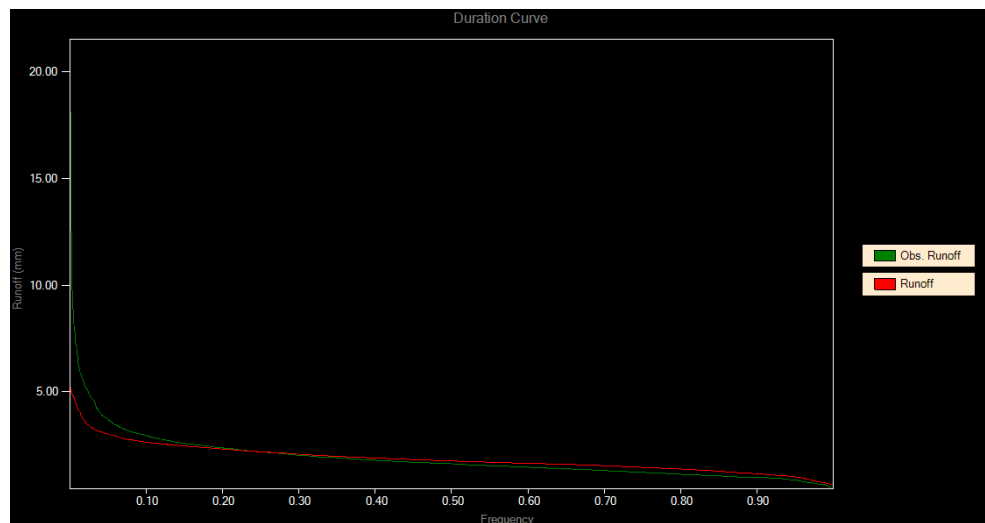
Grafica 4 Ejemplo Difference of the runoff en el programa rainfall runoff library



Fuente: (Boughton et al. 2003)

- **Duration Curve:** el programa aplica estadística básica, ordenando los datos observados y calculados de mayor a menor, la probabilidad acumulada en que el dato aparece a comparación de los demás y finalmente los grafica en escorrentía en el eje y Vs la probabilidad acumulada en el eje x. Es posible con esta grafica identificar si el volumen de agua calculado es similar al observado y se aplica en la validación. Un ejemplo de este se encuentra en la Grafica 5:

Grafica 5 Ejemplo Duration Curve en el programa rainfall runoff library



Fuente: (Boughton et al. 2003)

**Sensibilidad:** Para observar cómo afecta los distintos parámetros al modelo en general se puede evaluar en la pestaña de **Sensitivity**, en segundo lugar se selecciona el parámetro a evaluar, se puede manipular los límites del parámetro, en tercer lugar se selecciona la función objetivo, en último lugar en el botón **Plot Response Curve>>** el programa varía el parámetro en los límites dados, dejando las demás variables según las ajuste el usuario y graficando la variación del parámetro Vs la función objetivo seleccionada.

**Simulación:** Una vez se tienen los valores adecuados, se puede simular la escorrentía de la cuenca con información de precipitación y evapotranspiración de entrada. En la pestaña **Simulation** se selecciona el periodo en el cual se desea ejecutar el modelo, con el botón **Run** se efectúa la simulación, igualmente también se pueden ver esquemas, pero al ser una simulación únicamente se observan los datos calculados. Finalmente se pueden exportar los datos a un archivo en las unidades que se requieran.

#### 1.8.2.4 Clasificación de periodos según el índice ONI

En América del sur se reconocen dos fluctuaciones del clima en periodos de meses, años o decenios, del mismo modo se registran datos que fluctúan por encima o debajo del valor climático normal. Para el registro de estas anomalías es adecuado tomar como alusión el índice oceánico ONI o *Oceanic Niño Index* por sus siglas en inglés, el cual registra el comportamiento del agua oceánica que llega a las costas del Pacífico del país de Colombia y precisan el comportamiento de las variables atmosféricas sobre el país, relacionado también con el Niño 3.4. Por ello se puntualizan dos tipos de diversificación climática (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 2015):

- El fenómeno del niño se conoce como un aumento de la temperatura en la superficie del océano pacífico con un valor superior al normal, produciendo déficit de precipitaciones sobre el país.
- El fenómeno de la niña es una disminución de las temperaturas en la superficie del océano pacífico con un valor inferior al normal, causando un aumento en las precipitaciones sobre el país.

Para la evaluación de ocurrencia de estos periodos, la NOAA toma la temperatura del mar diariamente desde el año 1950 hasta la actualidad, con las variaciones que tiene el promedio mensual con respecto a la media, se puede encontrar los periodos calientes y fríos. Con lo anterior entonces, el comportamiento es descrito por la región Niño 3.4 que va en el cuadrante 5°N – 5°S, 150°W – 90°W, donde se utiliza para la predicción de los fenómenos descritos anteriormente, para determinar a qué fenómeno natural corresponde es cuando las temperaturas medias mensuales medidas superan el margen de  $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$  durante un periodo de seis meses o más. (Rasmusson y Carpenter 1982)

Por ello para identificar los periodos críticos se toma la información dada en la página de la NOAA “Cold & Warm Episodes by Season” del Climate Prediction Center, (NOAA’s Climate Prediction Center [sin fecha]) donde actualizan mensualmente esta información en la región Niño 3.4. para identificar años con tendencia cálida o fría se toma lo dicho por (Rasmusson y Carpenter 1982), poniendo por caso si se tienen seis o más meses cálidos dentro de un año se podría deducir que corresponde a un año cálido, en caso contrario que se tienen más meses sin temperaturas que consideren un fenómeno climático, se considera un año medio o “normal” y en casos específicos en los que no se tiene ninguno, entonces se considera dependiendo de qué fenómeno empieza y termina, se considera como un año de transición, es decir si el año empieza cálido y termina frío o empieza frío y termina cálido. Por consiguiente, se evalúan 6 situaciones de años en total:

- Todos los periodos sin modificación alguna
- Cálido (Fenómeno del Niño)



- Transiciones meteorológicas de Cálido – Frio
- Frio (Fenómeno de la Niña)
- Transiciones meteorológicas de Frio – Cálido
- Normal (Ocurrencia normal del clima)

En la Tabla 1 se resalta la conclusión de lo anteriormente dicho:

Tabla 1 Clasificación de periodos de clasificación

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Estado
1983	2.2	1.9	1.5	1.3	1.1	0.7	0.3	-0.1	-0.5	-0.8	-1.0	-0.9	Calor - Frio
1984	-0.6	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.6	-0.9	-1.1	Normal
1985	-1.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	Frio
1986	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2	Normal
1987	1.2	1.2	1.1	0.9	1.0	1.2	1.5	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	Caliente
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.9	-1.3	-1.3	-1.1	-1.2	-1.5	-1.8	-1.8	Frio
1989	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	Normal
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	Normal
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	1.2	1.5	Caliente
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1	Caliente
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1	Normal
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	1.0	1.1	Normal
1995	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0	Calor - Frio
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	Normal
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4	Caliente
1998	2.2	1.9	1.4	1.0	0.5	-0.1	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6	Calor - Frio
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7	Frio
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	Frio
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	Normal
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1	Caliente
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	Normal
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	Caliente
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8	Normal
2006	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9	Frio - Calor
2007	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6	Frio
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7	Frio
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6	Frio - Calor
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6	Calor - Frio
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0	Frio
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2	Normal
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	Normal
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7	Normal
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6	Caliente

Fuente: (NOAA's Climate Prediction Center [sin fecha])

1. Aplica un filtro a los datos para selección de los distintos fenómenos.
2. Selecciona esta información, lo copia y lo pega en un archivo Excel externo.
3. El archivo externo se encuentra con una formula en una hoja adicional la cual ordena la información por filas con el requisito del programa.
4. Selecciona la hoja con la información ya ordenada y exporta un archivo en formato de texto (.txt), y finalmente cambia la extensión a lo solicitado para el ingreso de datos (.awb).

### 1.8.2.5 Ingreso de datos

Este formato es un archivo de texto en sistema ASCII, donde contiene series de tiempo diarias. Los datos se encuentran ordenados en filas separados por espacios, sin una descripción al principio del archivo. Para un correcto ingreso de los datos se ordena de la siguiente manera: cada fila corresponde a un mes, el inicio de cada fila debe señalar en número de datos que se ingresan (este varía dependiendo del mes), seguido de los datos separados con un espacio, al final se señala el año al que corresponde y el mes, en la Ilustración 11 se muestra un ejemplo del mismo.

31	0	0	0	0	0	0.....	0	0	0	0	1.2	0	0	0	0	0.08	0.8	15.28	0.88	0.08	0	0	0	2001	1
28	0	0	0	0	0	0.....	1.68	0	0	0	0	0	0.24	0.56	3.28	0.88	0.4	0	1.28	3.12			2001	2	
31	0.08	0	0	0	0.....		0	0.08	0.8	0	2.48	0.8	3.28	1.28	0.08	0.24	0	0.88					2001	3	

62

Este tipo de archivo se escogió en vista de que la base de datos se encuentra almacenada en archivos Excel y el orden es similar al solicitado, por tanto, es más sencillo extraer este formato. Los datos ingresados de esta manera son la precipitación, la evapotranspiración de referencia y el caudal.

Hay que mencionar además que el programa detecta datos en blanco, para ello es necesario ingresar un valor que lo identifique, en este caso se dejó el predeterminado, el cual es “-9999”. Esto funciona muy bien para datos faltantes de caudal, al poder calibrar o validar el modelo en lapsos donde no se pudo registrar el caudal, pero resulta un conflicto si faltan datos de la ETo o de precipitación, ya que los modelos necesitan los dos valores para poder ejecutarse.

#### 1.8.2.6 Calibración y validación de los modelos

Identificando las herramientas del programa, se tomarán los datos de precipitación, ETo, caudal diario y área, calibrando los distintos parámetros de cada modelo, teniendo en cuenta la escala de tiempo analizada anteriormente para los distintos fenómenos climáticos. Para poder calificar el nivel de ajuste del modelo se toma el Coeficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE).

Según (Moriassi et al. 2007) “es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación de la varianza de datos medida”, lo anterior dicho asemeja los resultados obtenidos de los modelos con la media de los datos observados en campo. El coeficiente NSE se calcula con la ecuación (4):

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right] \quad (4)$$

Donde:

$Y_i^{obs}$  es el dato  $i$  observado que se evalúa

$Y_i^{sim}$  es el dato  $i$  simulado que se evalúa

$Y^{mean}$  es la media de los datos observados

El resultado de  $NSE$  puede variar en el rango  $(-\infty, 1]$ . Se tiene en cuenta para un  $NSE = 1$  se tiene una modelación perfecta, valores entre 0 y 1 son niveles aceptables para el modelo, y para datos  $< 0$  indica que la media aritmética representa mejor los datos observados que los valores simulados, en definitiva es un rendimiento inadmisibles (Moriassi et al. 2007), en la Tabla 2 se tiene una referencia de la calidad de calibración de modelo.

Tabla 2 valores referenciales del Criterio de Nash – Sutcliffe

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: (Molnar 2011)

El NSE es recomendado por varios autores, y es ampliamente utilizado en el mundo para expresar el ajuste a los hidrogramas. (Moriasi et al. 2007)

Para la búsqueda de los parámetros que mejor se acomoden al modelo para la representación de la escorrentía se emplea el optimizador de modelos Pattern search. (Podger 2004)

El funcionamiento de este es muy simple, es muy bueno en la búsqueda de modelos no lineales, es rápido puesto que la búsqueda sigue los siguientes pasos.

1. Inicia con los valores por defecto, incrementa y disminuye cada uno de los parámetros.
2. Valore la función objetivo para cada uno de los casos.
3. Si la función objetivo es buena en una dirección este ajusta ese valor.
4. Incremente cada parámetro en la dirección optima y valorando la función objetivo.
5. Repetir el paso 4 hasta que no mejore alguno de los parámetros.
6. Reduzca a la mitad el incremento y volver al paso 2.

Se utiliza este optimizador ya que se obtienen las mejores adaptaciones de los modelos evaluados con el coeficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe, además de que se ha ocupado esta combinación en el país, con resultados aceptables. (Duque et al. 2018)

Se destina un lapso de tiempo fuera de la calibración para notar el comportamiento del modelo en datos externos a los usados en la calibración (Podger 2004), a este proceso se le conoce como validación del modelo y da una idea del comportamiento del modelo en la simulación. Este proceso se realiza al tiempo en el software al calibrar el modelo.

1.8.3 Evaluación el recurso hídrico que se obtiene en distintos puntos de captación de agua del acueducto o sistema de riego, para detectar los impactos de sequía o de crecientes del río.

#### 1.8.3.1 Identificación de puntos de interés

Con una visita técnica que se formalizó en las cuencas se reconocieron puntos de captación de agua, todos estos de puntos importantes dentro de la economía y bienestar de la población que reside dentro de la cuenca. Estas visitas fueron programadas con funcionarios de estas entidades en la cual brindaron libre acceso a las bocatomas permitiendo el registro fotográfico y la toma de un punto de referencia geográfica con ayuda del GPS. Para la delimitación de la misma se recurre a lo dicho en el título 1.8.1.1, los shapefile con la cuenca delimitada se pueden encontrar en el Anexo 1.

#### 1.8.3.2 Caudales suministrados a las concesiones y uso del agua

Se efectúa el siguiente procedimiento:

1. Se consulta en la página web de las corporaciones autónomas regionales correspondientes a cada cuenca las resoluciones que reglamentan la recolección de aguas.
2. Según la empresa que toma el agua, buscar la regulación correspondiente.
3. Con el documento ya señalado se cita el caudal concesionado para el punto de captación, además dentro del documento también se especifica el uso al cual se le da al agua recolectada.
4. Cabe destacar que el caudal concesionado no es el que verdaderamente está tomando la bocatoma, este dato es dado por los funcionarios, y va a ser de comparación en la simulación de la cuenca.

#### 1.8.3.3 Caracterización de subcuencas de suministro

Recurriendo nuevamente a los SIG se repiten los pasos del título 1.8.1.1 para delimitar la cuenca, además del título 1.8.1.3.2 teniendo en cuenta que el código en este caso no funciona de manera correcta cuando no se tienen datos, o el dato de precipitación es igual a 0, así que se procede con:

1. Identificar la(s) estación(es) que identifican la precipitación de la cuenca.
2. Si los datos son discontinuos alrededor de todo el bucle (es decir, desde el 01/01/1983 hasta 31/12/2015) realizar cambios en los límites al bucle que recorre los meses, de lo contrario no.
3. Si solamente la define una estación, y esta cuenta con saltos de lecturas, entonces se aplica el código programado en Visual Basic de la Ilustración 12 para rellenar en donde falte información el número “-9999” para que el programa detecte la falta de información en este.

## Ilustración 12 Código de programación en caso de datos faltantes en una base de datos

```
1 Sub No_dato()  
2 Dim mes As Double  
3 For i = 1 To 15  
4 mes = Cells(i, 2).Value  
5 If ((mes = 1) Or (mes = 3) Or (mes = 5) Or (mes = 7) Or (mes = 8) Or (mes = 10) Or (mes = 12)) Then  
6 f = 34  
7 End If  
8 If ((mes = 4) Or (mes = 6) Or (mes = 9) Or (mes = 11)) Then  
9 f = 33  
10 End If  
11 If (mes = 2) Then  
12 f = 31  
13 End If  
14 For j = 1 To f  
15 If (IsEmpty(Cells(i, j))) Then  
16 Cells(i, j).Value = -9999  
17 End If  
18 Next j  
19 Next i  
20 End Sub
```

'Inicializa mes donde se asignará cual mes corresponde  
'inicio de bucle que recorre los meses  
'Lee en la hoja donde se almacena la información el mes a calcular  
'Fin del bucle que recorre los días del mes  
'Si la celda esta en blanco, entonces reemplaza este valor

Fuente: Propia

Para la ETo se hace únicamente el paso 3 del título 1.8.1.3.4, aplicando el código anterior.

### 1.8.3.4 Simulación en puntos de interés

Se simula con los parámetros de los modelos encontrados para la cuenca en general (Dominguez Calle 2000) en los fenómenos climáticos severos como lo son el niño y la niña, y obtener el posible caudal en estos puntos para su posterior comparación con el caudal recolectado en este punto y detectar visualmente los periodos en donde se puedan registrar déficit u exceso de agua que comprometan la captación, para ello se sigue con:

1. Copiar el archivo generado por el programa rrl donde contiene los valores asignados de la calibración en una carpeta externa y reemplazar los datos de ubicación y área con los datos de la cuenca en la cual se va a simular.
2. En la simulación aplicar el periodo de calibración (este puede variar según la cantidad de información disponible tanto de precipitación como de ETo).
3. Exportar los resultados de la simulación en el formato QDNR SILO daily time series format (.silo5) (Podger 2004), este se escoge dado que no se puede exportar el formato AWBM daily time series format.

Cada salto de línea corresponde a un día, y está compuesto de 5 columnas, donde la columna 1° corresponde al año, la 2° al mes, la 3° al día del mes, la 4° al número del día del año, es decir, de 1 a 365 y la 5° es el dato recolectado en un día dado, un ejemplo de este se observa en la Ilustración 13:

### Ilustración 13 Ejemplo de QDNR SILO daily time series format

```
2001 12 29 363 0
2001 12 30 364 0
2001 12 31 365 10.2
2002 1 1 1 0
2002 1 2 2 0
2002 1 3 3 0
2002 1 4 4 16
```

Fuente: (Podger 2004)

La sencillez de este formato facilita administrar la información en Microsoft Office Excel para generar gráficas y analizar la información.

4. Exportar los resultados a Excel para generar la gráfica de caudal vs tiempo, además de la línea recta que representa el caudal tomado.
5. Analizar los resultados obtenidos en la simulación.

#### 1.8.4 Transferencia de información a la comunidad científica

Se desarrolla un artículo para informar a la comunidad científica las conclusiones de este trabajo, así como la postulación a revistas científicas para su publicación y pueda ser usado como base para otros estudios relacionados a este trabajo. Este también será de interés por parte de las corporaciones autónomas citadas en este trabajo los cuales son la Corporación Autónoma Regional del Tolima CORTOLIMA y la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena CAM por tanto se notifica a estos entes la culminación de este trabajo una vez sea publicado.

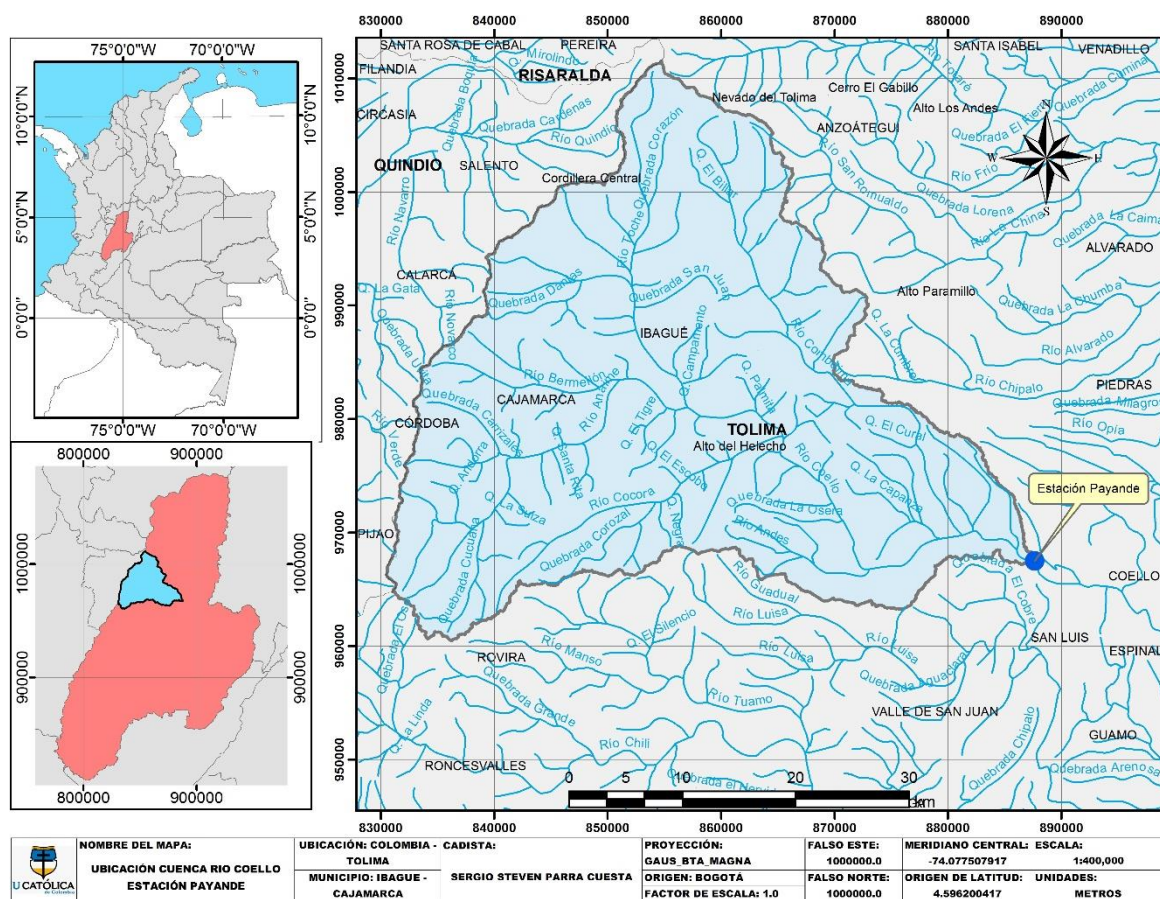


## 2. Identificación de características de las cuencas

### 2.1 Cuenca del río Coello

Para el punto de cierre de esta cuenca, se estableció en la estación limnimétrica Payande, ubicado en la vereda del mismo nombre, esta se encuentra entre los municipios de San Luis e Ibagué en la latitud  $4^{\circ}18'4''$  y longitud  $-75^{\circ}5'26''$ . Se tomó esta estación debido a que abarca gran parte de la cuenca, pero en consecuencia de administrar una vasta base de datos pluviométricos y climáticos. Recurriendo al Software ArcGIS 10.5 con las herramientas descritas en la metodología se delimita la cuenca y se calculan las características morfométricas. La identificación de la cuenca hasta la estación Payande se encuentra en la Ilustración 14.

Ilustración 14 Delimitación de cuenca río Coello hasta estación Payande



Fuente: Propia



### 2.1.1 Características morfométricas

Se identificaron las siguientes características morfométricas de la cuenca obtenidas hasta la estación limnimétrica Payande:

Área ( $A$ ):  $1531.65 \text{ km}^2$

Perímetro ( $P$ ):  $223.22 \text{ km}$

Longitud de la cuenca ( $L$ ):  $55.24 \text{ km}$

Ancho de la cuenca ( $B$ ):

$$B = \frac{1531.65 \text{ km}^2}{55.24 \text{ km}} = 27.73 \text{ km}$$

Factor de forma de Horton ( $k_f$ ):

$$k_f = \frac{1531.65 \text{ km}^2}{(55.24 \text{ km})^2} = 0.502$$

De acuerdo con (Lux 2014) y al factor de forma de Horton hallado anteriormente, que al tener un valor bajo, esta menos sujeta a crecientes, pero cabe resaltar que se debe realizar un análisis de suelos de la cuenca.

Coeficiente de Compacidad ( $k_c$ ):

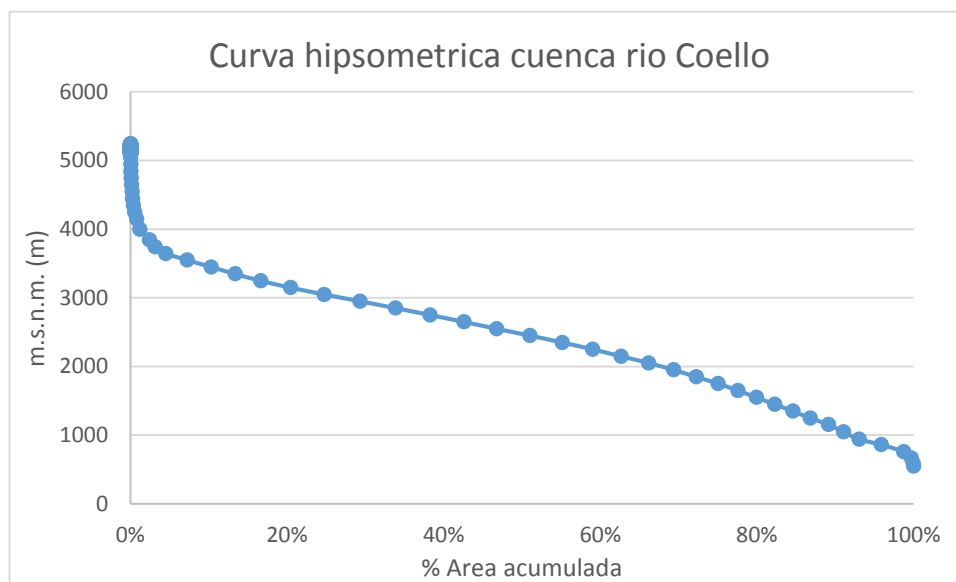
$$A = \pi * R^2 \rightarrow R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \rightarrow R = \sqrt{\frac{1531.65 \text{ km}^2}{\pi}} = 22.08 \text{ km}$$

$$k_c = \frac{223.22 \text{ km}}{2 * \pi * 22.08 \text{ km}} = 1.61$$

Teniendo en cuenta lo dicho por (Lux 2014) y el coeficiente de compacidad hallado anteriormente, se obtiene una cuenca oval, oblonga a rectangular, esto quiere decir que la cuenca no hay mucha concentración de agua, esto debido a que está alejado de la unidad.

Curva hipsométrica: Utilizando los SIG, se determinó la curva hipsométrica correspondiente a la cuenca mostrada en la Grafica 6:

Grafica 6 Curva hipsométrica cuenca del rio Coello



Fuente: Propia.

De esta grafica se puede concluir algunos aspectos: La principal causa para que al inicio de la curva, esta tenga una pendiente pronunciada, es que cierta parte de la cuenca hace parte del Volcán Nevado del Tolima, la cual llega a una altura máxima de 5280 m.s.n.m. (IDEAM [sin fecha]) y la pendiente que se tiene es alta, por ende el área correspondiente es muy poca. También se puede concluir según (Lux 2014) es una cuenca sedimentaria.

### 2.1.2 Características hidrológicas

El rio Coello nace en la unión de dos ríos en la cuenca alta, el primero es el rio Toche, el cual parte desde el norte de la cuenca, parte de esta se encuentra protegida por el parque nacional natural Los Nevados, posterior se une con la quebrada Dantas formando el rio Coello, siendo más adelante alimentado por el rio Bermellón, la cual se encuentra al sur de la cuenca, dentro de esta cuenca esta parte de la ruta 40 que comunica al sur y al océano Pacífico del país (Instituto Nacional de Vías - INVIAS [sin fecha]), también está el municipio de Cajamarca, el cual extrae agua de un afluente de esta cuenca para el consumo de sus pobladores. No muy lejos de la desembocadura de este rio se encuentra el rio Cocora, el cual cuenta con problemas de erosión, cuentan los pobladores que es por extracción minera ilegal de material granular en el lecho y alrededores del rio Cocora. Llegando casi a la estación Payande confluye el rio Combeima. El rio Combeima con importancia económica al surtir de agua al acueducto de Ibagué, capital del departamento del Tolima, esta cuenca inicia desde el nevado del Tolima, y baja por la parte noreste de la cuenca del rio Coello, además de cubrir gran parte de la ciudad

de Ibagué, almacenado la escorrentía de la ciudad, el agua tratada por la planta de tratamiento de agua residual.

## 2.1.3 Características meteorológicas

### 2.1.3.1 Estaciones climáticas utilizadas

En la Tabla 3 se detallan todas las estaciones empleadas para esta cuenca, igualmente en la Ilustración 15 está el mapa de la ubicación de las estaciones alrededor de la cuenca. Para esta cuenca, se tiene bastante información climática, en total se solicitaron y analizaron 41 estaciones de todo tipo pertenecientes al IDEAM, de las cuales 23 son útiles para la precipitación media de la cuenca esto según los polígonos de Thiessen que se observan en la Ilustración 16, por ello 8 fueron utilizadas únicamente como base para calcular los mapas de isoyetas de precipitación media mensuales y media multianuales de precipitación que caen sobre la cuenca, descartando 7 estaciones por información insuficiente, tiempos de registro no son útiles o información no suministrada. Para la caracterización climática de la zona se analizaron 14 estaciones, de las cuales 5 estaciones automáticas se descartaron al no suministrarse el registro de datos.

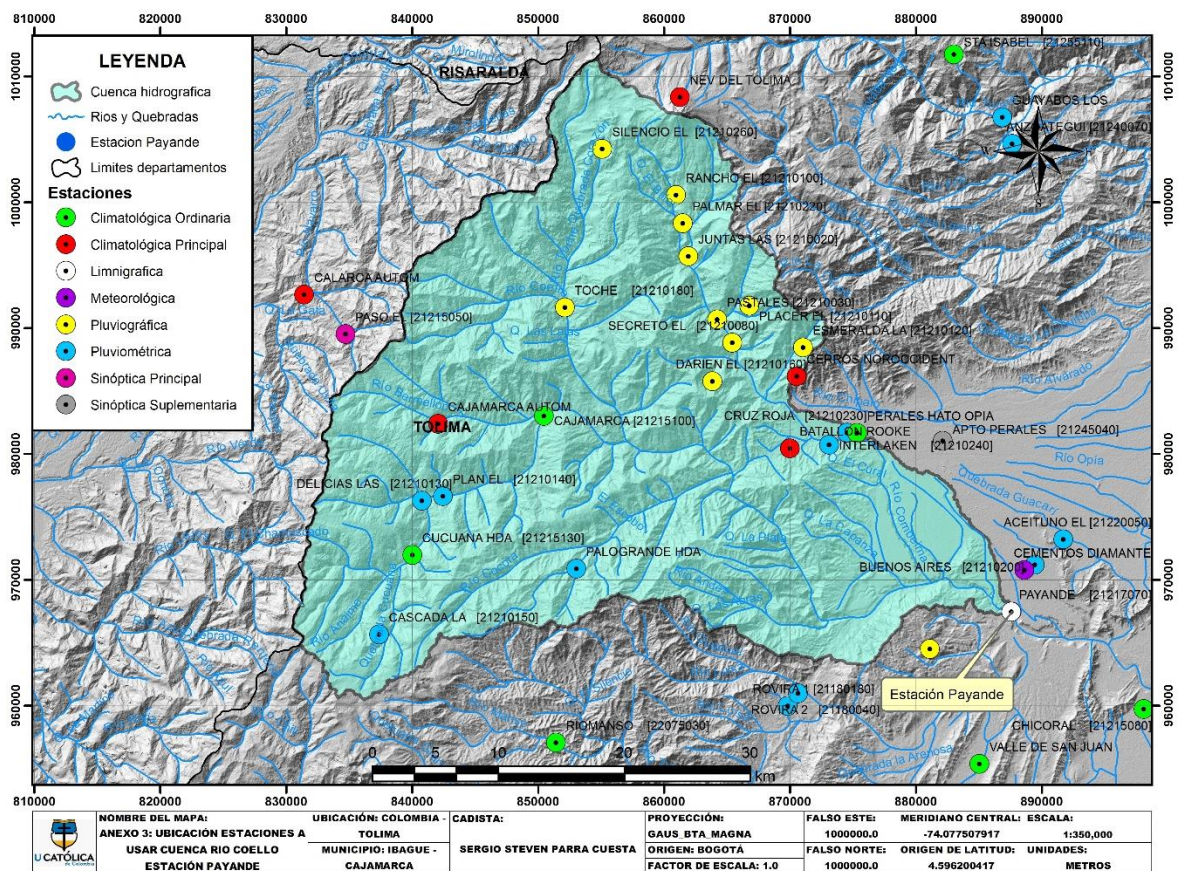
Tabla 3 Estaciones metereologicas utilizadas en la cuenca del rio Coello

Tabal de estaciones metereológicas utilizadas en la cuenca del rio Coello												
Codigo	Nombre	Tipo	Categ	Corriente	Depto	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud	Fecha inst.	Fecha reg. ult.	Uso Prec.
21220050	ACEITUNO EL [21220050]	CON	PM	OPIA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°21'12"	75°03'11"	680	01/01/1987	30/09/2017	Mapa isoy.
21240070	ANZOATEGUI [21240070]	CON	PM	LA CHINA	TOLIMA	ANZOATEGUI	4°38'15"	75°05'24"	1814	10/12/1974	30/11/2017	Mapa isoy.
21245040	APTO PERALES [21245040]	CON	SS	OPIA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°25'27"	75°08'22"	943	01/01/1971	30/11/2017	Prec. Media
21215180	BATALLON ROOKE	AUT	CP	COMBEIMA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°25'06"	75°14'55"	1323	10/12/2005	-----	Ninguno
21217250	BOCATOMA [21217250]	CON	HID	LM	TOLIMA	IBAGUÉ	4°27'47"	75°15'37"	1509	15/06/1983	31/12/2015	Comparación
21210200	BUENOS AIRES [21210200]	CON	PM	COELLO	TOLIMA	IBAGUÉ	4°20'07"	75°04'24"	728	01/12/1986	30/11/2017	Mapa isoy.
21215100	CAJAMARCA [21215100]	CON	CO	BERMELLON	TOLIMA	CAJAMARCA	4°26'29"	75°25'28"	1,920	01/09/1964	30/03/2011	Prec. Media
21215190	CAJAMARCA AUTOM	AUT	CP	COMBEIMA	TOLIMA	CAJAMARCA	4°26'08"	75°30'01"	2530	10/12/2005	-----	Ninguno
26125300	CALARCA AUTOM	AUT	CP	LA VIEJA	QUINDIO	CALARCÁ	4°31'42"	75°35'47"	2255	04/10/2004	-----	Ninguno
21210150	CASCADA LA [21210150]	CON	PM	ANAIME	TOLIMA	CAJAMARCA	4°17'04"	75°32'32"	3280	01/09/1983	31/10/2017	Prec. Media
21215140	CEMENTOS DIAMANTE	CON	ME	COELLO	TOLIMA	IBAGUÉ	4°19'53"	75°04'50"	780	13/11/1968	31/08/2014	Prec. Media
21215160	CERROS NOROCCIDENT	AUT	CP	COMBEIMA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°28'13"	75°14'38"	1946	18/10/2005	-----	Ninguno
21215080	CHICORAL [21215080]	CON	CO	COELLO	TOLIMA	ESPINAL	4°13'54"	74°59'43"	432	01/05/1967	31/08/2017	Mapa isoy.
21210230	CRUZ ROJA [21210230]	CON	PM	COMBEIMA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°25'47"	75°12'28"	1,176	01/06/1997	31/12/2017	Prec. Media
21215130	CUCUANA HDA [21215130]	CON	CO	ANAIME	TOLIMA	CAJAMARCA	4°20'29"	75°31'07"	2229	01/01/1987	31/10/2017	Prec. Media
21210160	DARIEN EL [21210160]	CON	PG	QDA CORAZON	TOLIMA	IBAGUÉ	4°28'00"	75°18'15"	1920	01/10/1984	27/02/2011	Prec. Media
21210130	DELICIAS LAS [21210130]	CON	PM	COELLO	TOLIMA	CAJAMARCA	4°22'49"	75°30'42"	2,095	01/02/1984	30/11/2017	Prec. Media
21210120	ESMERALDA LA [21210120]	CON	PG	QDA CAY	TOLIMA	IBAGUÉ	4°29'27"	75°14'22"	1965	01/06/1982	30/09/2017	Prec. Media
22050100	GUAYABOS LOS	CON	PM	SALDANA	TOLIMA	COYAMA	4°39'24"	75°05'49"	330	27/08/1988	30/08/2017	Mapa isoy.
21210240	INTERLAKEN [21210240]	CON	PM	COMBEIMA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°25'16"	75°13'14"	1174	10/10/1994	30/04/2017	Prec. Media
21210020	JUNTAS LAS [21210020]	CON	PG	QDA PERLAS	TOLIMA	IBAGUÉ	4°33'23"	75°19'18"	1765	01/08/1971	30/09/2017	Prec. Media
21217180	MONTEZUMA [21217180]	AUT	LM	COMBEIMA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°28'55"	75°17'10"	1450	15/12/1973	13/02/2017	Comparación
21215150	NEV DEL TOLIMA	AUT	CP	COMBEIMA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°40'15"	75°19'40"	4635	18/10/2005	-----	Ninguno
21210220	PALMAR EL [21210220]	CON	PG	COMBEIMA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°34'48"	75°19'32"	2200	01/08/1971	31/08/2017	Prec. Media
21210170	PALOGRADE HDA	CON	PM	COCORA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°19'55"	75°24'05"	2212	11/11/1986	30/09/2017	Prec. Media
21215050	PASO EL [21215050]	CON	SP	TOCHECITO	TOLIMA	CAJAMARCA	4°30'00"	75°34'00"	3,264	01/05/1945	31/10/1980	Ninguno
21210030	PASTALES [21210030]	CON	PG	COMBEIMA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°30'40"	75°18'03"	1602	01/06/1958	31/05/2017	Prec. Media
21217070	PAYANDE [21217070]	CON	HID	COELLO	TOLIMA	SAN LUIS	4°18'05"	75°05'25"	562	15/08/1959	31/03/2015	Caudal
21245010	PERALES HATO OPIA	CON	CO	OPIA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°25'47"	75°12'02"	826	01/09/1965	31/08/2017	Prec. Media
21210110	PLACER EL [21210110]	CON	PG	COMBEIMA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°31'15"	75°16'40"	2170	10/06/1983	30/11/2017	Prec. Media
21210140	PLAN EL [21210140]	CON	PM	ANAIME	TOLIMA	CAJAMARCA	4°23'01"	75°29'49"	3,088	01/10/1983	30/09/2017	Prec. Media
21210100	RANCHO EL [21210100]	CON	PG	COMBEIMA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°36'01"	75°19'50"	2670	07/06/1983	31/12/2008	Prec. Media
21210190	RESACA LA [21210190]	CON	PG	LUISA	TOLIMA	SAN LUIS	4°16'28"	75°08'54"	1250	01/12/1986	31/10/2016	Prec. Media
22075030	RIOMANSO [22075030]	CON	CO	MANSO	TOLIMA	ROVIRA	4°12'24"	75°24'56"	2,053	06/12/1973	30/09/2017	Mapa isoy.
21180180	ROVIRA 1 [21180180]	CON	PM	LUISA	TOLIMA	ROVIRA	4°14'00"	75°15'00"	950	25/10/1958	25/02/1972	Ninguno
21180040	ROVIRA 2 [21180040]	CON	PM	LUISA	TOLIMA	ROVIRA	4°14'33"	75°14'33"	848	25/09/1954	30/11/2017	Prec. Media
21210080	SECRETO EL [21210080]	CON	PG	COMBEIMA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°29'39"	75°17'24"	1,482	15/05/1985	02/12/2018	Prec. Media
21210260	SILENCIO EL [21210260]	CON	PG	COMBEIMA	TOLIMA	IBAGUÉ	4°38'00"	75°23'00"	2500	18/08/1999	31/10/2017	Prec. Media
21255110	STA ISABEL [21255110]	CON	CO	RECIO	TOLIMA	SANTA ISABEL	4°42'06"	75°07'55"	2817	01/09/1975	29/09/2017	Mapa isoy.
21210180	TOCHE [21210180]	CON	PG	COELLO	TOLIMA	IBAGUÉ	4°31'10"	75°24'35"	1,991	01/11/1986	30/11/2017	Prec. Media
21185080	VALLE DE SAN JUAN	CON	CO	LUISA	TOLIMA	LE DE SAN JU	4°11'31"	75°06'46"	591	15/11/1986	01/12/2018	Mapa isoy.

21105030	ALGECIRAS [21105030]	CON	CO	NEIVA	HUILA	ALGECIRAS	2°31'18.175"19°20.1	1155	15/04/1971	21/06/2015	Clima
21110410	COLONIA LA HDA	CON	PG	CEBAS	HUILA	NEIVA	2°48'0" -75°5'0"	2100	18/06/1983	30/06/1994	Prec. Media
21110430	GIRONDA LA HDA	CON	PG	CEBAS	HUILA	NEIVA	2°54'22.1"-75°7'13.6"	1060	18/06/1983	31/10/2017	Prec. Media
21117080	GUAYABO [21117080]	CON	LM	CEBAS	HUILA	NEIVA	2°55'16"-75°8'58.8"	650	15/10/1976	31/12/2015	Caudal
21115170	LA PLATA AUTOMATICA	AUT	CP	LAS CEBAS	HUILA	NEIVA	2°45'32.9"-75°4'28.4"	2101	20/07/2005	-----	Ninguno
21115100	PALACIO-VEGALARGA	CON	CO	FORTALECILLAS	HUILA	NEIVA	2°56'33.5"-75°3'59"	1100	11/10/1971	31/12/2016	Clima
21110130	PUEBLO NUEVO	CON	PG	CEBAS	HUILA	NEIVA	2°48'19.8"-75°5'7.2"	1580	01/10/1985	31/10/2012	Prec. Media
21110400	STA HELENA [21110400]	CON	PG	CEBAS	HUILA	NEIVA	2°51'4.1"-75°6'29.5"	1160	18/06/1983	30/11/2017	Prec. Media

Fuete: (IDEAM 2014)

Ilustración 15 Ubicación de estaciones climáticas usadas en la cuenca del rio Coello



Fuente: (IDEAM 2014)

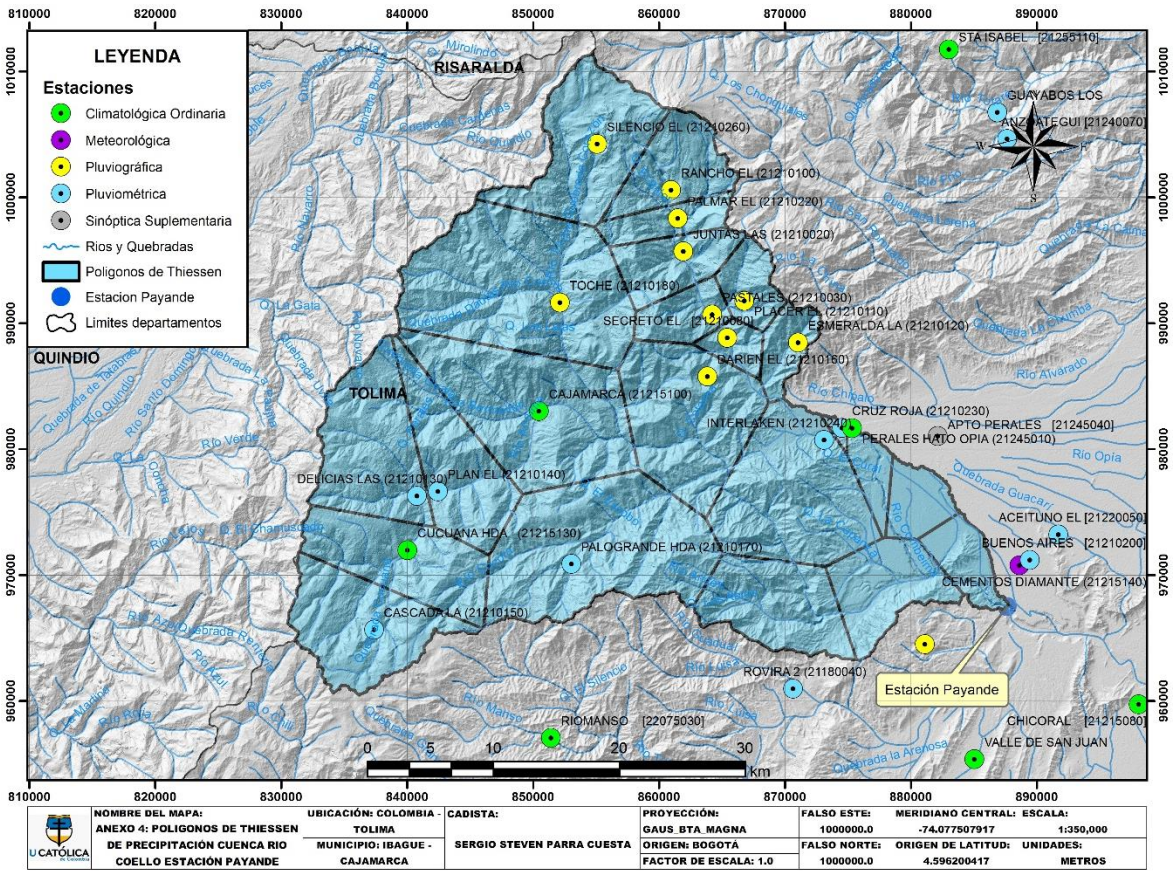
### 2.1.3.2 Comportamiento climático de la zona

Para describir el comportamiento de la precipitación media de la cuenca, se recurre a la teoría de Polígonos de Thiessen, se muestran en la Ilustración 16 y describen el área correspondiente a cada estación pluviométrica, cabe destacar que no todas las estaciones afectan directamente dentro de la cuenca. Para el clima se usa la misma metodología de los polígonos de Thiessen, estos se muestran en la



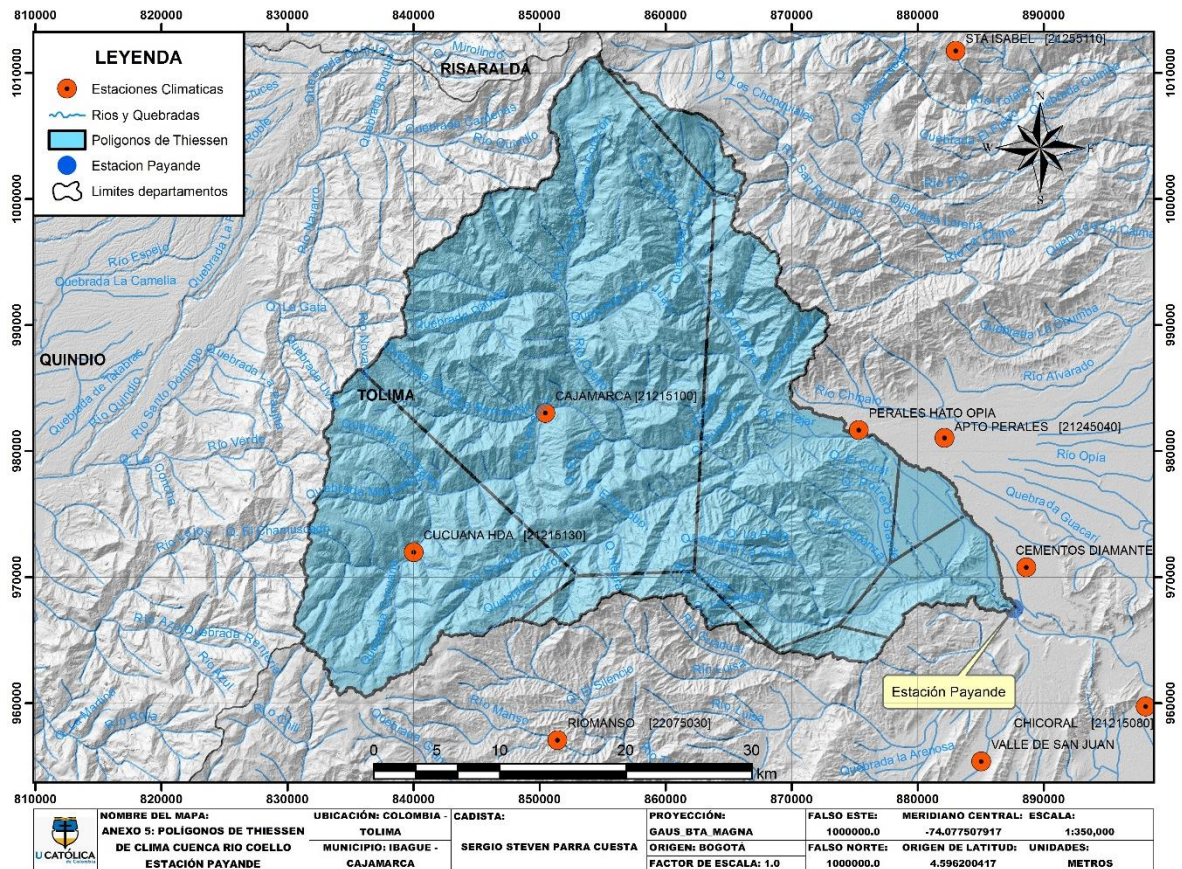
Ilustración 17, aunque una estación no abarca en la cuenca, esta se usa en la evaluación del recurso hídrico para la bocatoma del distrito de riego USOCOELLO.

Ilustración 16 Distribución de los Polígonos de Thiessen de estaciones pluviométricas en la cuenca del río Coello



Fuente: Propia:

Ilustración 17 Distribución de los Polígonos de Thiessen de estaciones climaticas en la cuenca del rio Coello



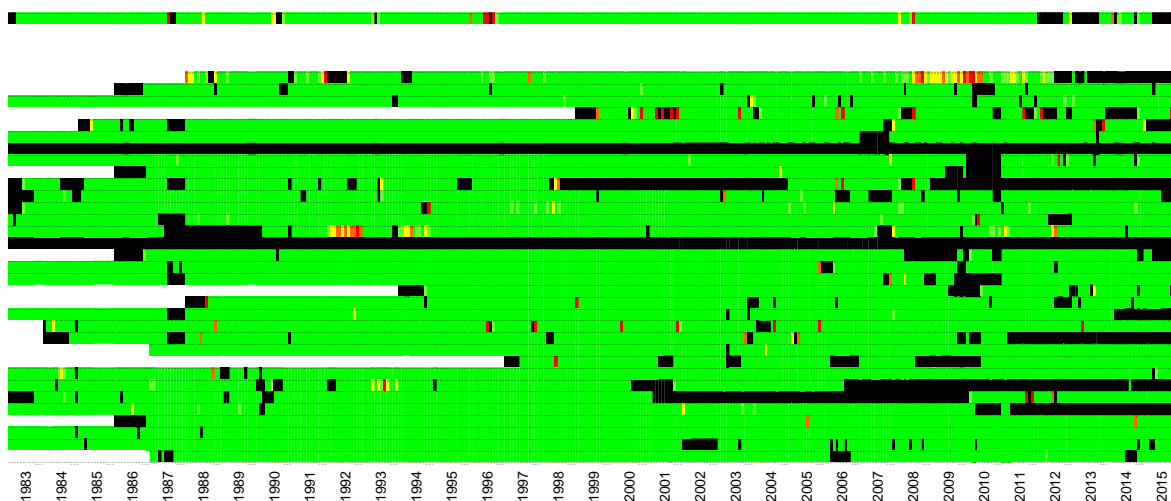
Fuente: Propia

#### 2.1.3.2.1 Disponibilidad de información

El periodo se escogió debido a la unión que existe entre el conjunto de datos de precipitación con los datos conocidos de caudal en la línea de tiempo, en la Ilustración 18 se evalúa según lo dicho en la metodología, la cantidad de información faltante en las estaciones de precipitación se observa en la parte de abajo de la ilustración, mientras en la parte superior la información disponible de caudal en la estación Payande. En la Ilustración 18 se denota que la información disponible de precipitación contrasta con el disponible de caudal, por tanto el periodo usado para la precipitación abarcan los datos desde 1 de enero de 1983 hasta el 31 de diciembre de 2015.



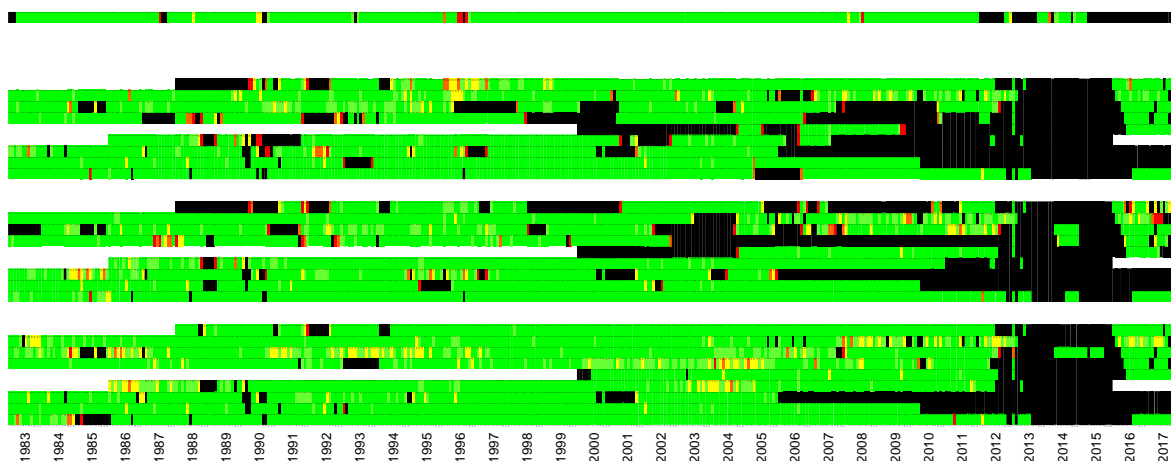
Ilustración 18 Línea de tiempo de datos disponibles de precipitación cuenca del rio Coello



Fuente: Propia

Si se toma una línea de tiempo más extensa, las estaciones en servicio son menores en caso de ir más atrás de 1983 y además se limita por la disponibilidad de los datos de caudal los cuales abarcan desde el 1 de abril de 1983 hasta el 31 de marzo de 2015. Además si se extiende a periodos más recientes se ve limitado por los datos entregados hasta finales de 2015, haciendo imposible esta acción.

Ilustración 19 Línea de tiempo de datos disponibles de temperatura cuenca del rio Coello



Fuente: Propia

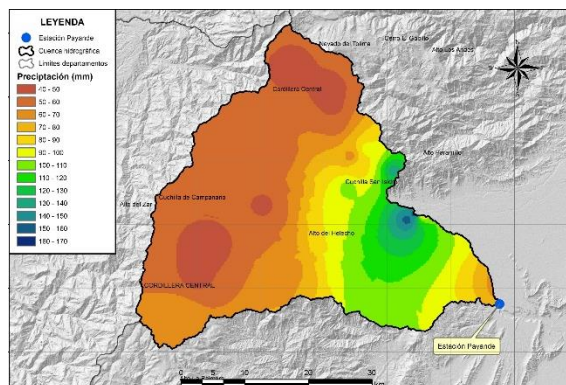
En la Ilustración 19 se detalla una línea de tiempo para los datos disponibles de temperatura, en este se muestran 9 estaciones climáticas, donde el conjunto

segundo conjunto de la ilustración representan los datos faltantes de los datos de temperatura mínima, el tercer conjunto representa la media y el cuarto la alta, se identifica solo temperatura al ser primordial para calcular la ETo mientras que la primera línea destaca los datos de caudal. A pesar de tener estaciones en servicio desde 1978, se toma desde el 1 de enero de 1983 para identificación las características climáticas además de la ETo, la cantidad de datos disponibles se reduce a partir del año 2010, para considerar un periodo más prolongado se recurre hasta el 31 de octubre de 2012 pues posterior a esta fecha se encuentra limitado por la cantidad excesiva de información faltante.

### 2.1.3.2.2 Precipitación

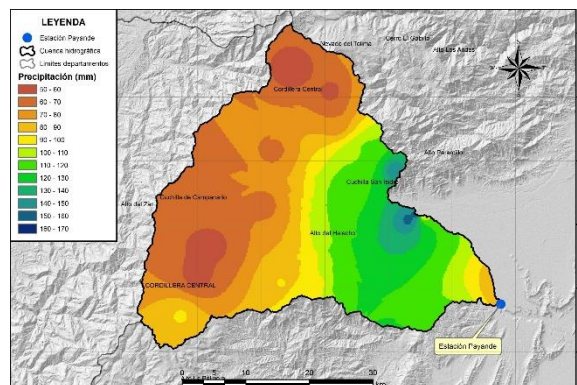
Los mapas de isoyetas mensuales se presentan desde la Ilustración 20 hasta la Ilustración 31 calculados con datos de precipitación desde 1983 hasta 2015, por los mapas se obtiene una precipitación bimodal, donde los meses más húmedos son abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre con precipitaciones que pueden llegar a los 302.3 mm en el mes de abril. Los meses más secos corresponden a enero, febrero, marzo, junio, julio, agosto y diciembre con precipitaciones que pueden bajar hasta los 44.2 mm procedente del mes de enero y un máximo alrededor de 200 mm en algunas zonas. Las precipitaciones se concentran en alrededores de la ciudad de Ibagué contrario en lo alto de la cuenca donde las precipitaciones son menores, concentrándose en las sequias sobre la cuenca del río Berbellón.

Ilustración 20 Mapa de Isoyetas mes de enero



Fuente: Propia

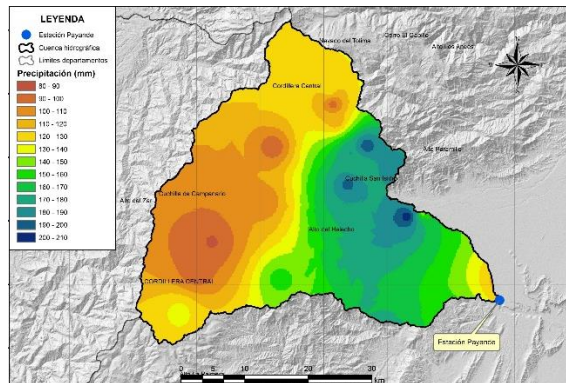
Ilustración 21 Mapa de Isoyetas mes de febrero



Fuente: Propia

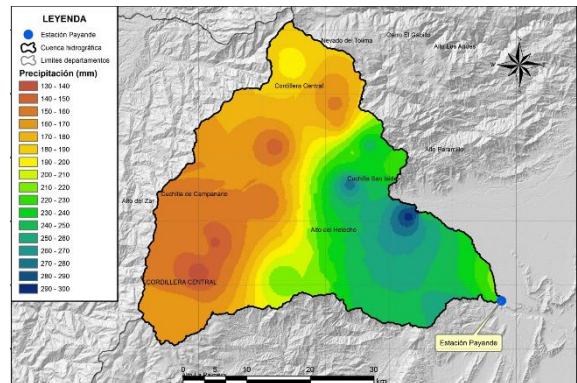


Ilustración 22 Mapa de Isoyetas mes de marzo



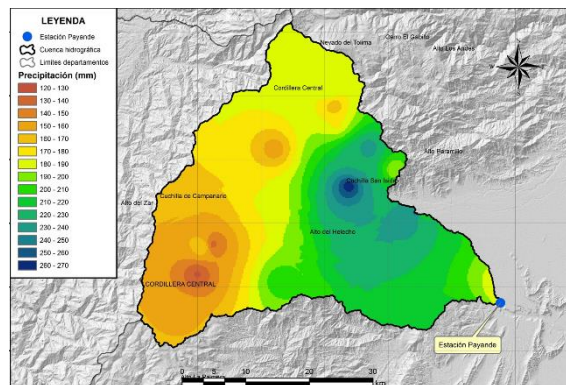
Fuente: Propia

Ilustración 23 Mapa de Isoyetas mes de abril



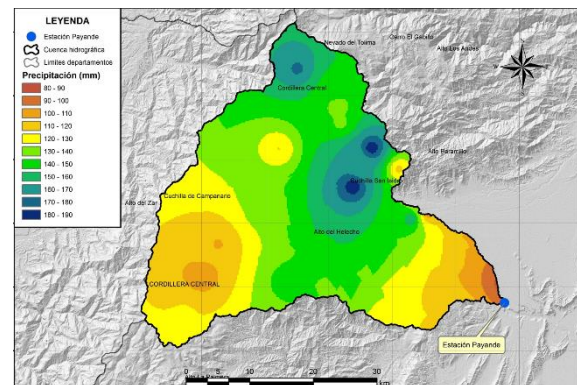
Fuente: Propia

Ilustración 24 Mapa de Isoyetas mes de mayo



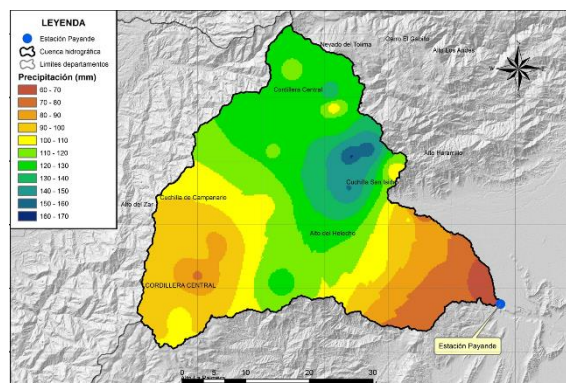
Fuente: Propia

Ilustración 25 Mapa de Isoyetas mes de junio



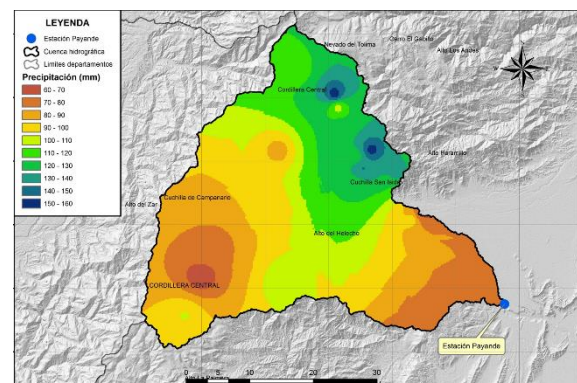
Fuente: Propia

Ilustración 26 Mapa de Isoyetas mes de julio



Fuente: Propia

Ilustración 27 Mapa de Isoyetas mes de agosto



Fuente: Propia

Ilustración 28 Mapa de Isoyetas mes de septiembre

Ilustración 29 Mapa de Isoyetas mes de octubre

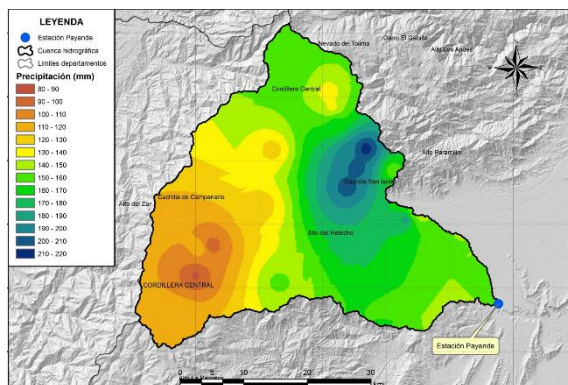


Ilustración 30 Mapa de Isoyetas mes de noviembre

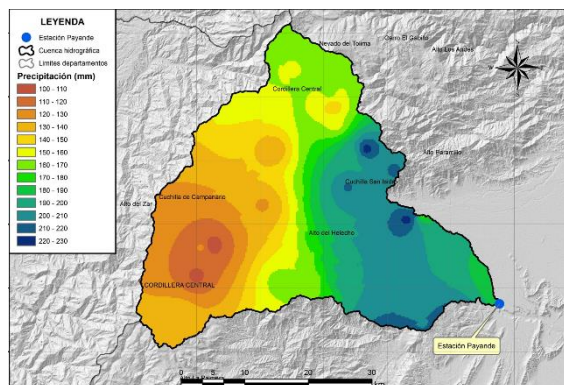


Ilustración 31 Mapa de Isoyetas mes de diciembre

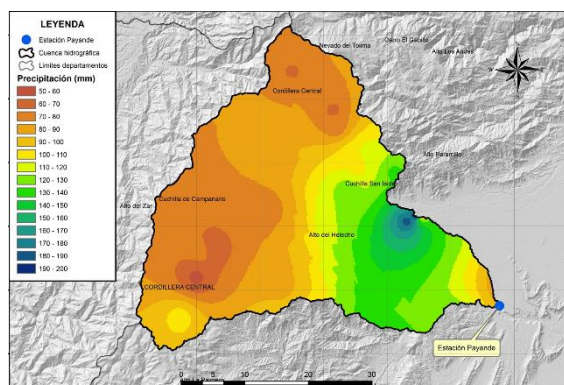
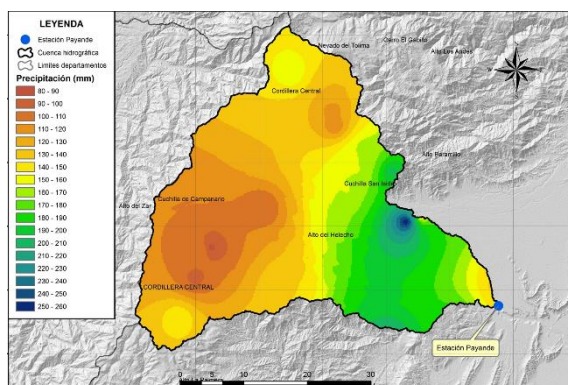
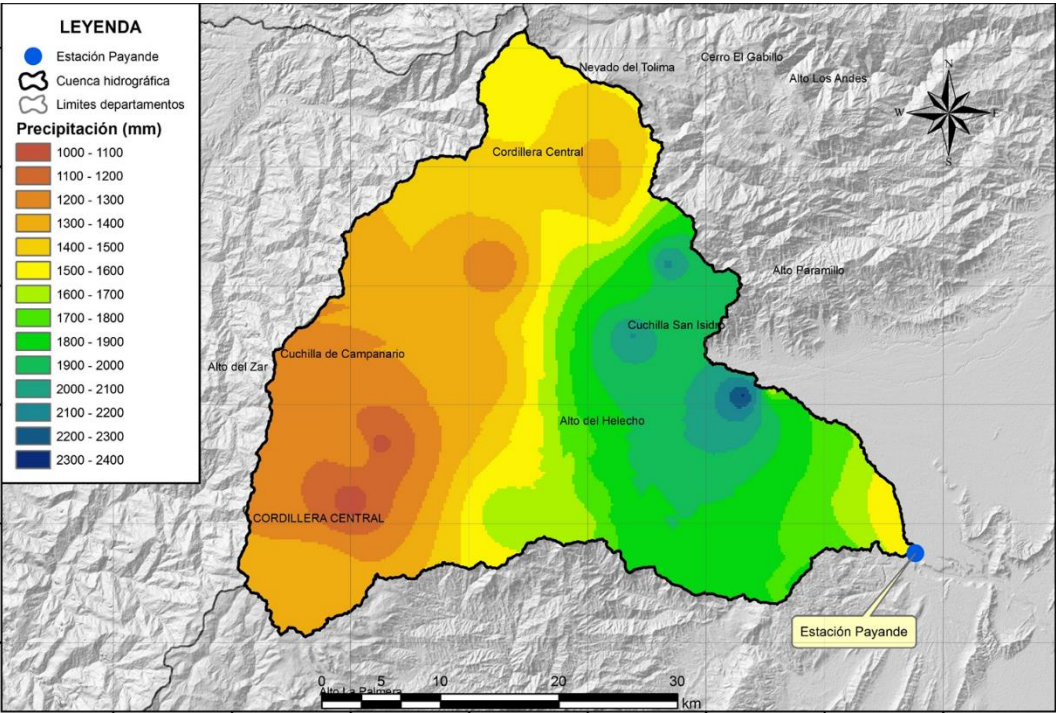


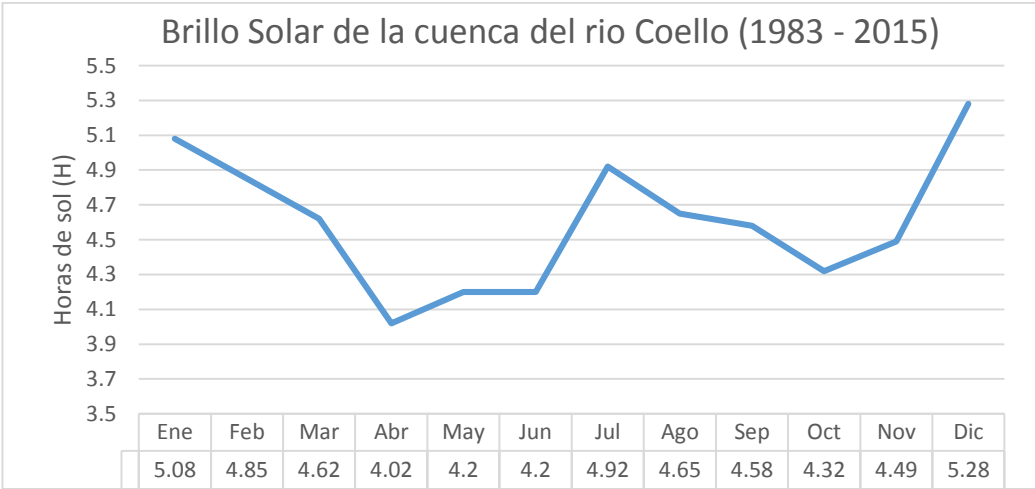
Ilustración 32 Mapa de isoyetas precipitación media multianual



Fuente: Propia

2.1.3.2.3 Brillo solar

Grafica 7 Horas de brillo solar promedio mensual cuenca del rio Coello



Fuente: Propia



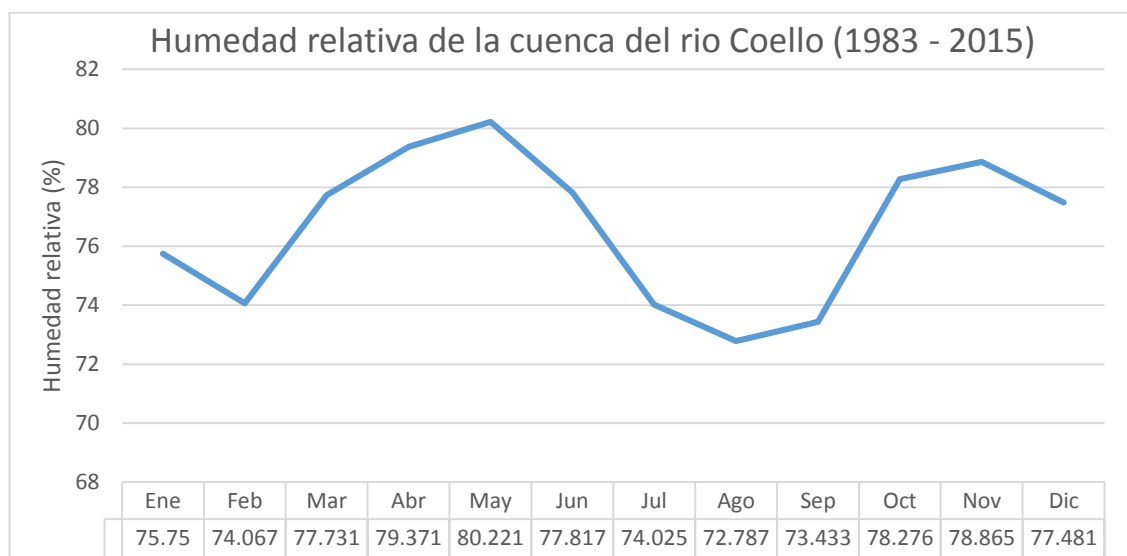
Las lecturas de las estaciones corresponden al número de horas de brillo solar diarias, las estaciones que tomaron esta información son limitadas, solo 5 estaciones registraron, igualmente en los datos de viento.

En la Grafica 7 se observa el número de horas de brillo solar promedio mensual, el cual es inverso a la precipitación, es decir, en los meses de mayor precipitación se tiene un menor brillo solar, en cambio, para los meses más secos se tiene un brillo solar alto.

#### 2.1.3.2.4 Humedad relativa

Esta información se obtuvo de todas las estaciones climáticas, igualmente la temperatura baja, media y alta. La Grafica 8 tiene dos picos destacados, esto ya que el comportamiento de la precipitación al ser bimodal, aumenta la humedad del aire en estas épocas, en cambio en temporadas de poca precipitación, esta disminuye.

Grafica 8 Humedad relativa promedio mensual cuenca del rio Coello

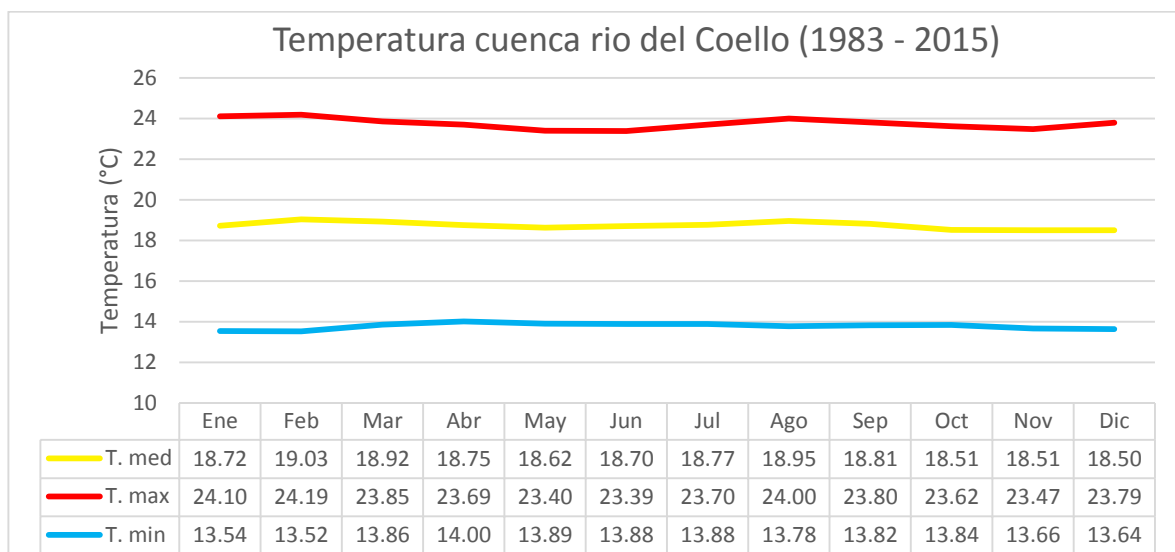


Fuente: Propia

#### 2.1.3.2.5 Temperatura

Esta se observa en la Grafica 9 Tiene un comportamiento aproximadamente constante en la temperatura máxima, media y mínima en todos los meses. La temperatura media fue dada independiente de la alta y la baja, en la Grafica 9 se observa que se encuentra aproximadamente en el medio de ambos.

Grafica 9 Temperatura promedio mensual en la cuenca del rio Coello

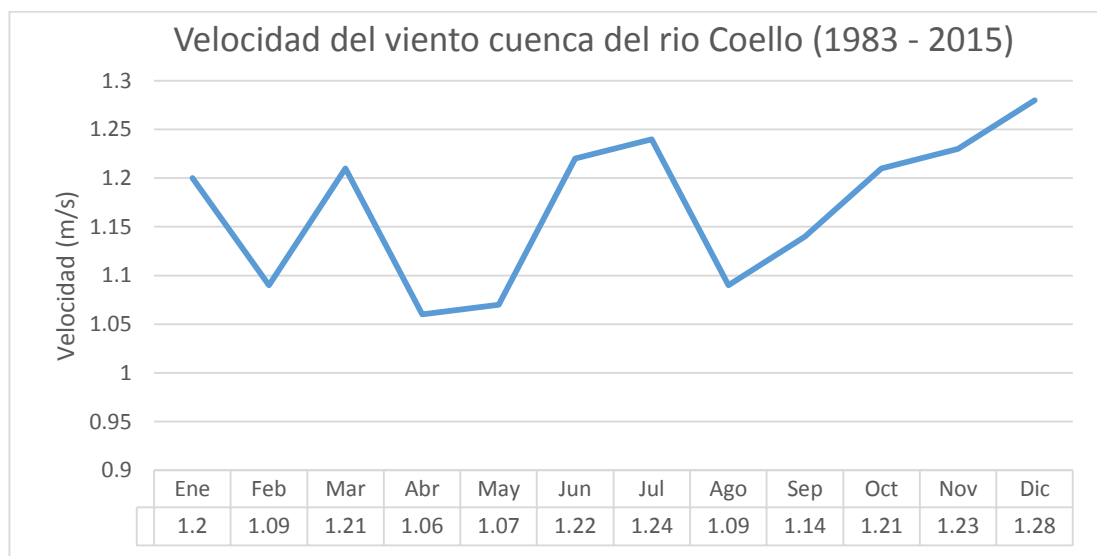


Fuente: Propia

#### 2.1.3.2.6 Velocidad del viento

Los datos de velocidad media de la cuenca se utilizaron para el relleno de información faltante en el cálculo de la evapotranspiración de referencia, ya que es obligatoria en la suposición de esta. La variación del viento sobre toda la cuenca se aprecia en la Grafica 10.

Grafica 10 Velocidad del viento cuenca del rio Coello

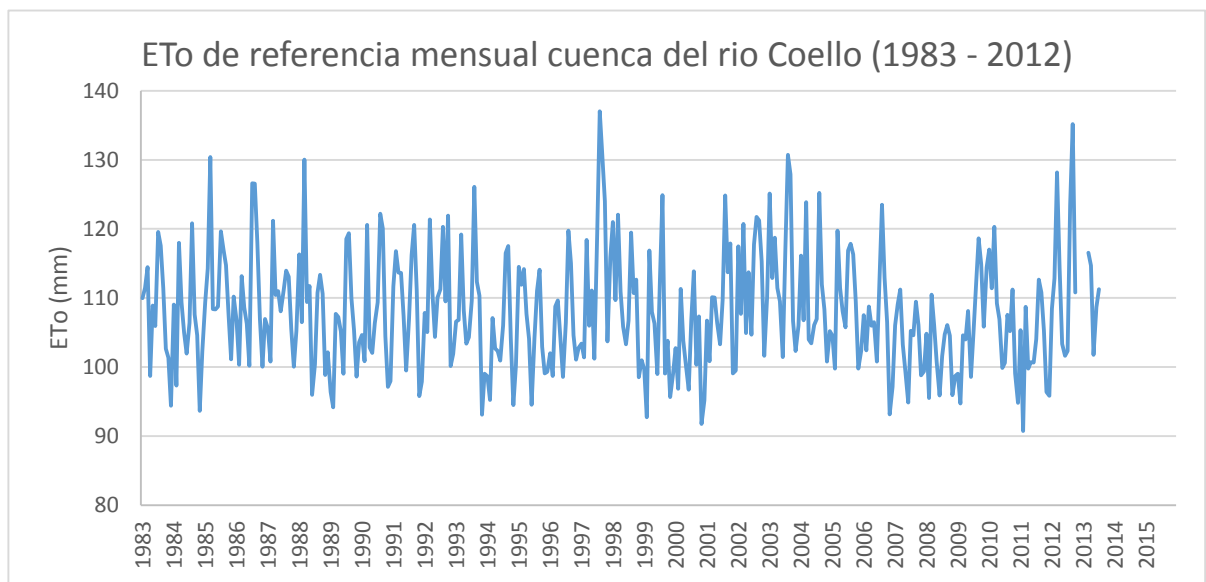


Fuente: Propia

### 2.1.3.3 Evapotranspiración de referencia

Aplicado lo dicho en la metodología, un resumen de la ETo obtenida se da en la Grafica 11 donde corresponde a la evapotranspiración de referencia media mensual. Para el cálculo de la ETo media de la cuenca se toma la teoría de Polígonos de Thiessen, lo rellena algunos días faltantes en una que otra estación. En él se puede ver una  $ET_o$  homogénea, con muy pocas variaciones significativas, pero debido a datos faltantes desde noviembre de 2012 y datos intermitentes en el 2013, lo cual limita el periodo para aplicar los modelos de recursos hídricos está entre enero de 1983 y agosto de 2012.

Grafica 11 ETo de referencia mensual cuenca del rio Coello

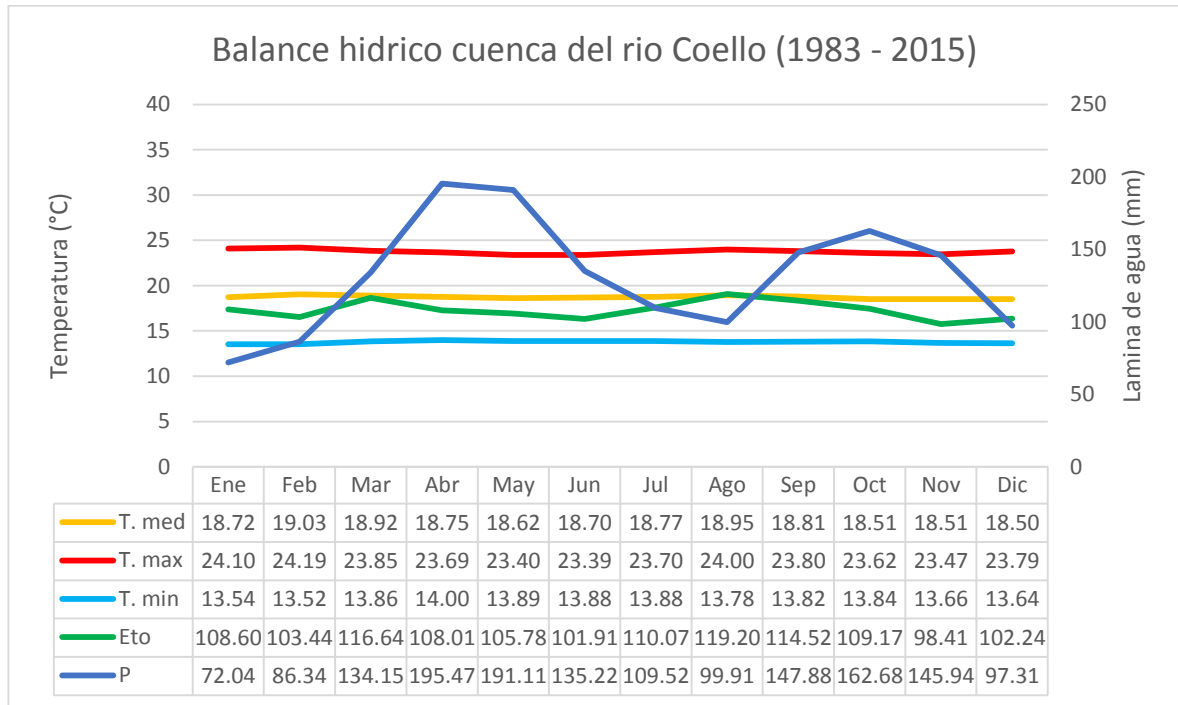


Fuente: Propia

### 2.1.3.4 Balance hídrico de la cuenca

En base a hidrología clásica, se compara la temperatura mínima, media y máxima, con la precipitación y la evapotranspiración media mensual, esta se distingue en la Grafica 12 donde se tiene pocas épocas en las cuales hay déficit de agua, solamente en el mes de enero la ETo es menor a la precipitación y este es el único mes con déficit de agua, lo que quiere decir que la cuenca tiene una abundancia de agua aprovechable en actividades como cultivos o generación eléctrica en lo que queda del año.

Grafica 12 Balance hídrico de la cuenca del rio Coello



Fuente: Propia

#### 2.1.3.5 Registros de caudal de la estación Payande

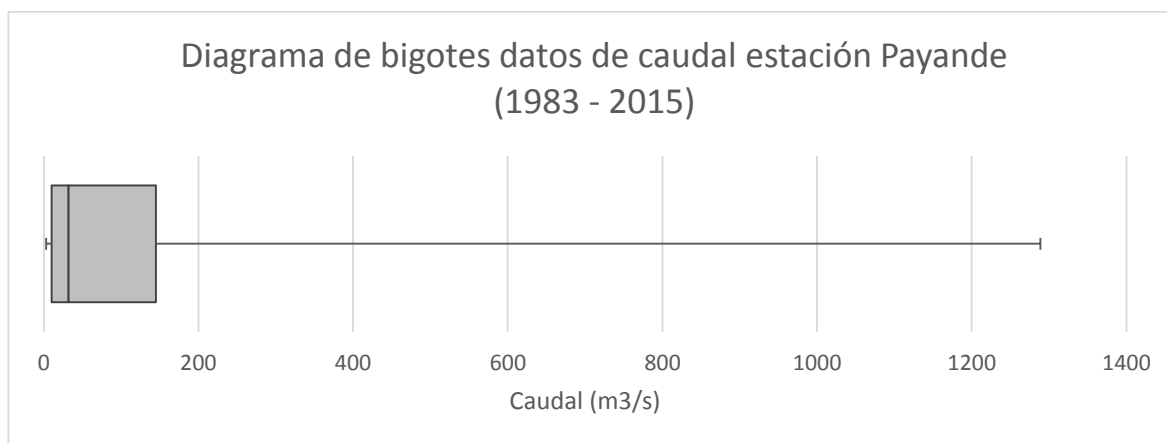
Con la información brindada por el IDEAM sobre la estación Payande, en la cual se realizó el cierre de la cuenca, se suministró información desde el 1 de abril de 1983 hasta el 31 de marzo de 2015 con intermitencias en la lectura de datos, que van desde un mes hasta nueve meses en todo el periodo de registro. Con un análisis estadístico de los registros el cual lo recomienda Podger en el libro rainfall runoff library (Podger 2004) el cual es el manual de uso del programa y Ven Te Chow en su libro Hidrología aplicada (Chow, Maidment y Mays 1994). Recurriendo a estadística básica, se obtiene el promedio y la desviación estándar de todos los datos diarios, los cuales da:

$$\bar{x} = 39.75 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S = 34.19 \text{ m}^3/\text{s}$$

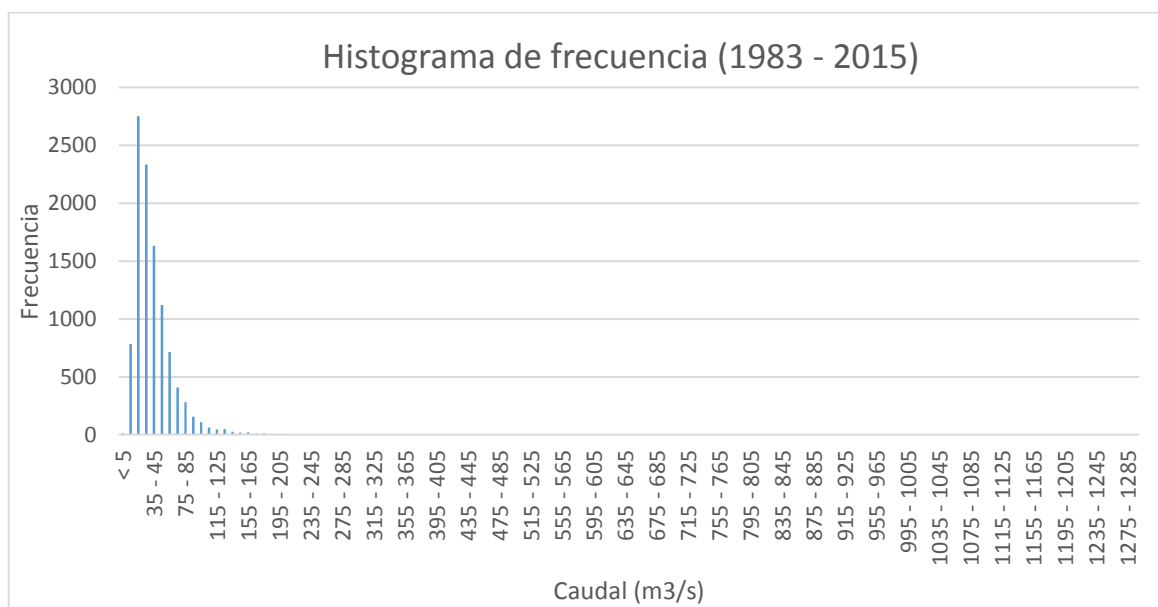
De lo anterior se deduce una alta dispersión de los datos. La Grafica 13 es un diagrama de bigotes donde representa el percentil 1% o  $P_{01}$ , el  $P_{99}$  y el valor medio. Citando la desviación estándar del caudal, se justifica porque es tan alto este valor con el  $P_{99}$  tan elevado, también derivado a la magnitud de la media del caudal registrado.

Grafica 13 Diagrama de bigotes datos de caudal estación Payande



Fuente: Propia

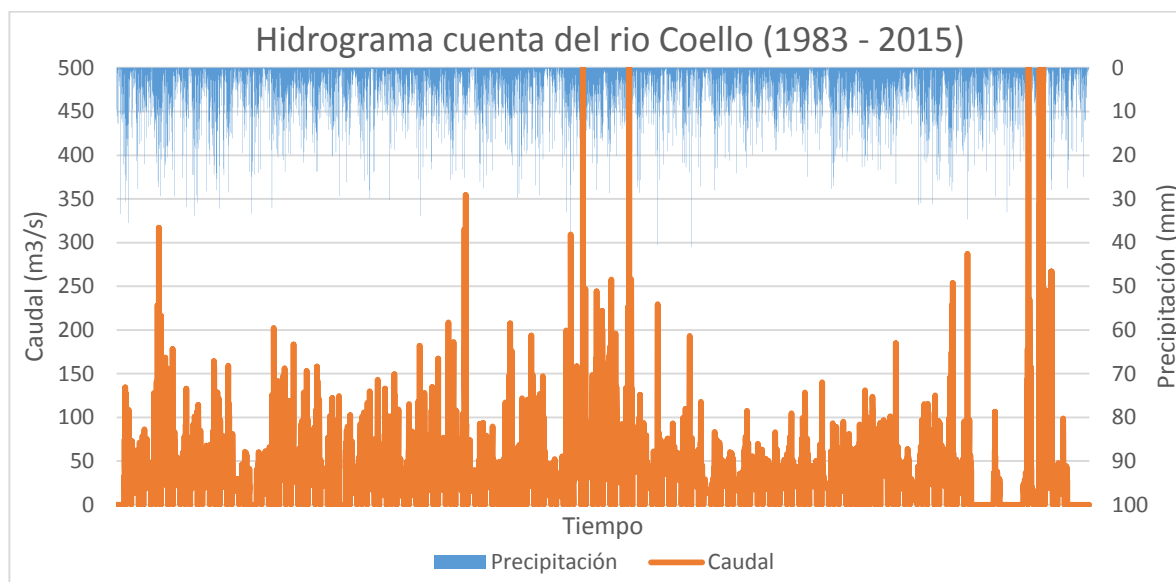
Grafica 14 Histograma de frecuencia caudal estación Payande



Fuente: Propia



Grafica 15 Hidrograma cuenca del rio Coello



Fuente: Propia

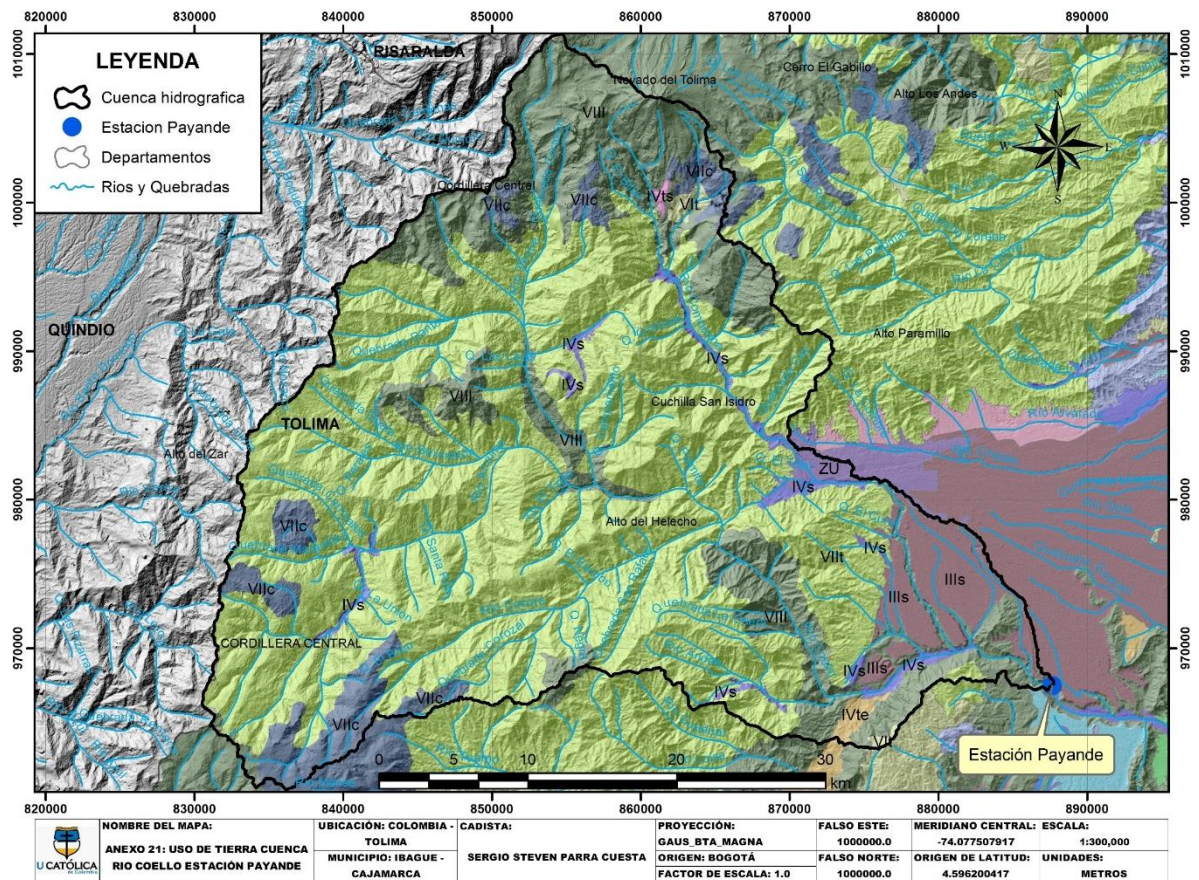
A esto también se puede añadir un histograma de frecuencia agrupando todos los datos. (Grafica 14) Buscando una mejor adaptación por parte de los a la cuenca se eliminó el  $P_{99}$  que corresponde a los caudales superiores a  $144.92 \text{ m}^3/\text{s}$ , igualmente se observa la ubicación de los valores a eliminar con respecto a las lecturas de días anteriores y posteriores, para ello se elabora un hidrógrama mostrado en la Grafica 15, a pesar de que no se muestra de manera correcta toda la información, ya que corresponde a información diaria, si se examinaron que los picos de caudal sean consecuentes a un nivel de precipitación considerable que justifique el comportamiento del caudal. Esta restricción no se plasma en los caudales muy altos, porque se observan comportamientos similares en otros periodos y no tiene las mismas consecuencias con el caudal, sobre todo los últimos dos años de registro al exagerar el caudal consecuente de la cuenca a cantidades las cuales exceden los  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ , este puede ser considerado como un caudal extremo que puede afectar la calibración y se puede descartar para esta tarea.

## 2.1.4 Características fisiográficas

### 2.1.4.1 Clasificación de las tierras por capacidad de uso

Con referencia a los archivos TOLIMA\_CAPACIDAD\_VF tomados de IGAC (Instituto Geografico Agustin Codazzi [sin fecha]) y el documento Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento de Tolima (Instituto Geografico Agustin Codazzi 2004), se plasmó el mapa en la Ilustración 33, del cual se resuelve lo siguiente:

Ilustración 33 Mapa uso del suelo de la cuenca del rio Coello



Fuente: (Instituto Geografico Agustin Codazzi [sin fecha])

**Clase III (4.1%):** Correspondiente a la parte baja de la cuenca, este sector tiene una retención de humedad baja, con algunos fragmentos gruesos, pendiente menor al 7% y es susceptible a inundaciones. Este suelo es apto para cultivos y la ganadería.

**Clase VII (72.02%):** estos suelos abarcan la gran mayoría de la cuenca, se destaca por ser inadecuados para actividades agrícolas por tener pendientes escarpadas, cerca del 50 al 75%, los suelos son superficiales a moderadamente profundos, bien drenados y de fertilidad baja. Para estas zonas se requiere conservar la vegetación natural existente con reforestación y repoblamiento de la fauna.

**Clase VIII (20.55%):** se encuentran en la parte alta y baja de la cuenca, estos suelos se destacan por ser totalmente inadecuados para cultivos y forestación, principalmente por las pendientes pronunciadas, la erosión, las temperaturas muy bajas y una escasa capa de suelo. Los suelos ubicados sobre los 3,700 m de altitud, son de clima muy frio y aptos para la vegetación natural como frailejones, musgos,



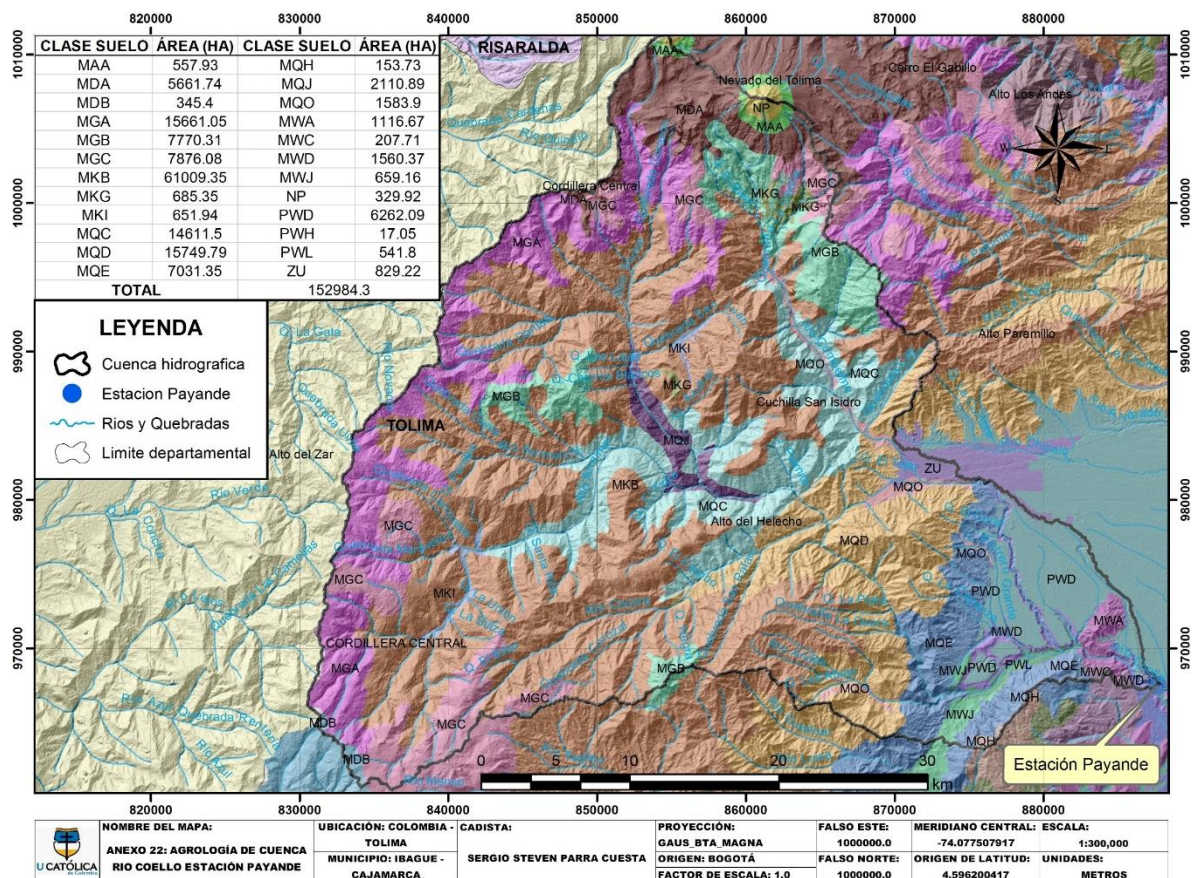
líquenes, entre otros. Los ubicados en la parte baja tienen pendientes superiores al 75% con una erosión excesiva y su superficie es mayoritariamente roca.

Resumidamente se puede decir que el suelo de la cuenca debe de utilizarse para la conservación de la vida silvestre y de las plantas características de la zona, ya que está limitado principalmente por la fuerte pendiente de su topografía y son suelos de baja fertilidad.

#### 2.1.4.2 Agrología de suelos

De los archivos TOLIMA\_SUELOS\_VF tomados del IGAC (Instituto Geografico Agustin Codazzi [sin fecha]) y con la descripción de los suelos dados en Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento de Tolima (Instituto Geografico Agustin Codazzi 2004) se plasmó el mapa en la Ilustración 34 y del cual se deduce lo siguiente:

Ilustración 34 Mapa agrología del suelo de la cuenca del rio Coello



Fuente: (Instituto Geografico Agustin Codazzi [sin fecha])

**MKB (39.88%):** ubicado en la parte alta y media de la cuenca, con un clima frío y húmedo con temperaturas que rondan entre los 12 a 18 °C. Tiene pendientes elevadas al 50% con relieve quebrado a escarpado. Existe erosión ligera debido al sobrepastoreo y por tanto se presentan algunos deslizamientos y escurrimiento difuso. El material del suelo es principalmente cenizas volcánicas con algunas rocas metamórficas, bien drenados, ácidos, ricos en materia orgánica y de fertilidad baja. La vegetación natural ha sido arrasada para dar a paso a la ganadería extensiva y la agricultura.

**MQD (10.30%):** dispuesto sobre la parte media a baja de la cuenca, justo debajo del municipio de Ibagué. Combinado de tonalitas y granodioritas con un relieve escarpado entre el 50 y 75 %, una erosión ligera, suelos profundos y bien drenados. Los suelos son ligeramente ácidos y fertilidad moderada, la vegetación natural ha sido reemplazada por cultivos y ganadería extensiva.

**MGA (10.23%):** situado en toda la parte alta de la cuenca, compuesto principalmente por cenizas volcánicas, con un relieve muy escarpado y pendientes largas con suelos bien drenados y profundos. Esta principalmente compuesto de cenizas volcánicas sobre rocas andesita y cuarzodiorita, son suelos ácidos ricos en materia orgánica, pero de baja a moderada fertilidad. Con un nivel de erosión ligera a moderado y deslizamientos localizados, la vegetación natural ha sido devastada para dar paso a cultivos y ganadería.

**MQC (9.55%):** ocupa la parte media de la cuenca, se destaca por ser de relieve fuertemente escarpado, con pendientes que rondan el 50 y 75%, con una erosión ligera y bien drenada. El material está constituido de rocas metamórficas normalmente mezcladas con cenizas volcánicas, son ácidos, pero con una fertilidad moderada, en este suelo se realizan actividades agrícolas.

## 2.1.5 Características ambientales

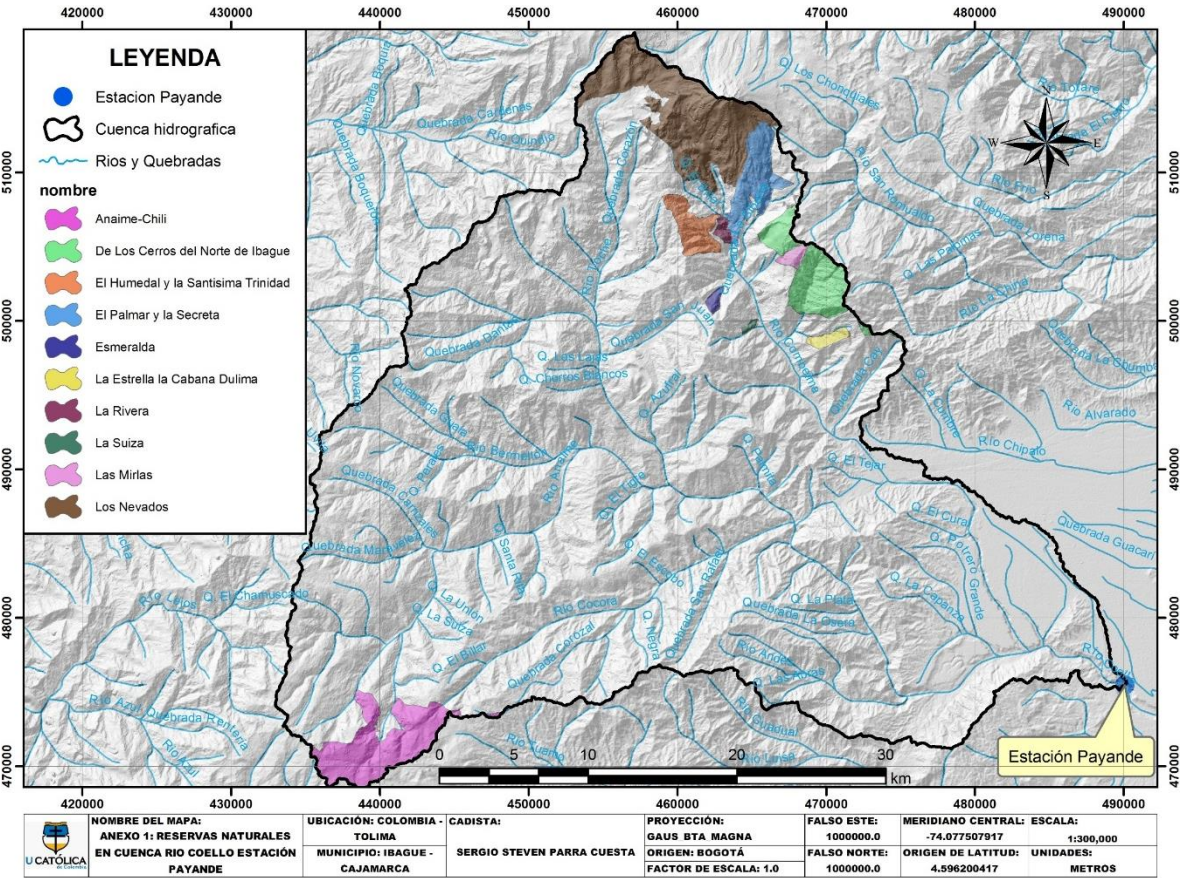
### 2.1.5.1 Reservas naturales

La cuenca cuenta con diversas reservas naturales, entre los cuales hay catalogados parques nacionales naturales, reservas forestales protectoras nacionales entre otros (Sistema de Información Ambiental de Colombia [sin fecha]), estos se pueden apreciar en la Ilustración 35 y se tomó de referencia los shapefiles facilitados por el SIAC (Sistema de Información Ambiental de Colombia [sin fecha]). Todas estas reservas suman un total de  $138.7 \text{ km}^2$ , lo que quiere decir que cubre un 9% de la cuenca, no es relevante aunque al no considerar toda la cuenca hasta su desembocadura este porcentaje hasta este punto puede disminuir. La reserva natural más grande protege al nevado del Tolima, con otras áreas circundantes que la abarcan aún más. La principal organización que protege estas importantes áreas de conservación es CORTOLIMA, quien protege distintos sitios de alta montaña clave para el recurso hídrico de la cuenca del río Combeima, el cual surte al



acueducto de Ibagué. Mientras el nevado del Tolima hace parte a un Parque Nacional Natural, de gran importancia tanto natural como turística.

Ilustración 35 Mapa reservas naturales de la cuenca del rio Coello

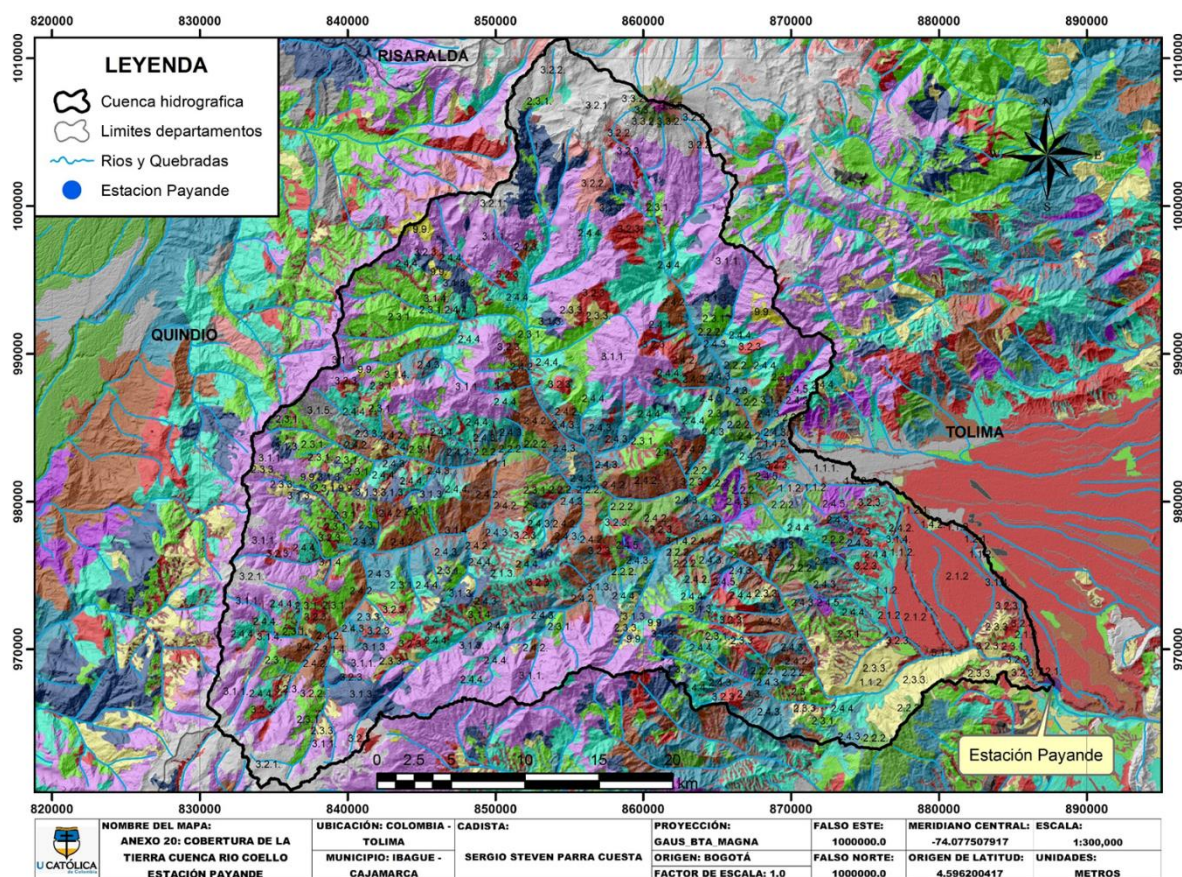


Fuente: (Sistema de Información Ambiental de Colombia [sin fecha])

### 2.1.5.2 Cobertura de suelos en la cuenca.

Al tener en cuenta los shapefiles Cobertura\_Tierra\_2010\_2012 tomados de Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) (Sistema de Información Ambiental de Colombia [sin fecha]) donde aplican la metodología de CORINE Land Cover y es explicado en el libro Leyenda nacional de coberturas de la tierra (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 2010), se genera el mapa de coberturas de la cuenca en la Ilustración 36, se puede concluir a grandes rasgos lo siguiente:

Ilustración 36 Mapa cobertura del suelo de la cuenca del río Coello



Fuente: (Sistema de Información Ambiental de Colombia [sin fecha])

**Territorios artificiales (0.97%):** en este se incluye el área construida de los municipios de Ibagué, Cajamarca, y conjuntos de viviendas en Villa María y Payandé.

**Territorios agrícolas (52.1%):** se puede afirmar entonces que poco más de la mitad de toda la cuenca se utilizan para cultivos, estos comprenden de la siguiente manera:

- Cultivos de cereales como arroz, maíz sorgo, cebada y trigo. (3.08%)
- Cultivos de aceite y almidón. (0.05%)
- Cultivos de café, cacao y viñeros. (3.6%)
- Pastos limpios o con maleza. (15.44%)
- Mosaicos de pastos, cultivos y espacios naturales. (29.93%)

Los cultivos se resaltan de manera notable en la parte baja de la cuenca, cerca al punto de cierre, donde se tiene una gran extensión de cultivo de cereales cerca al



punto de cierre de la cuenca, y cultivos de café, cacao y viñeros en la parte baja-media de la cuenca, cerca de la ciudad de Ibagué.

Se puede concluir que, debido al pasto, se obtiene una permeabilidad del suelo ya que es utilizado para la ganadería y similares, bajo en la parte occidental y oriental de la cuenca y en la parte alta de esta, se observa poca invasión de pastos en el nevado del Tolima. Por toda la cuenca hay mosaicos de pastos, cultivos y espacios naturales, los cuales probablemente no afecten la escorrentía de la cuenca, debido a su distribución entre los bosques, pero no cerca al punto de cierre.

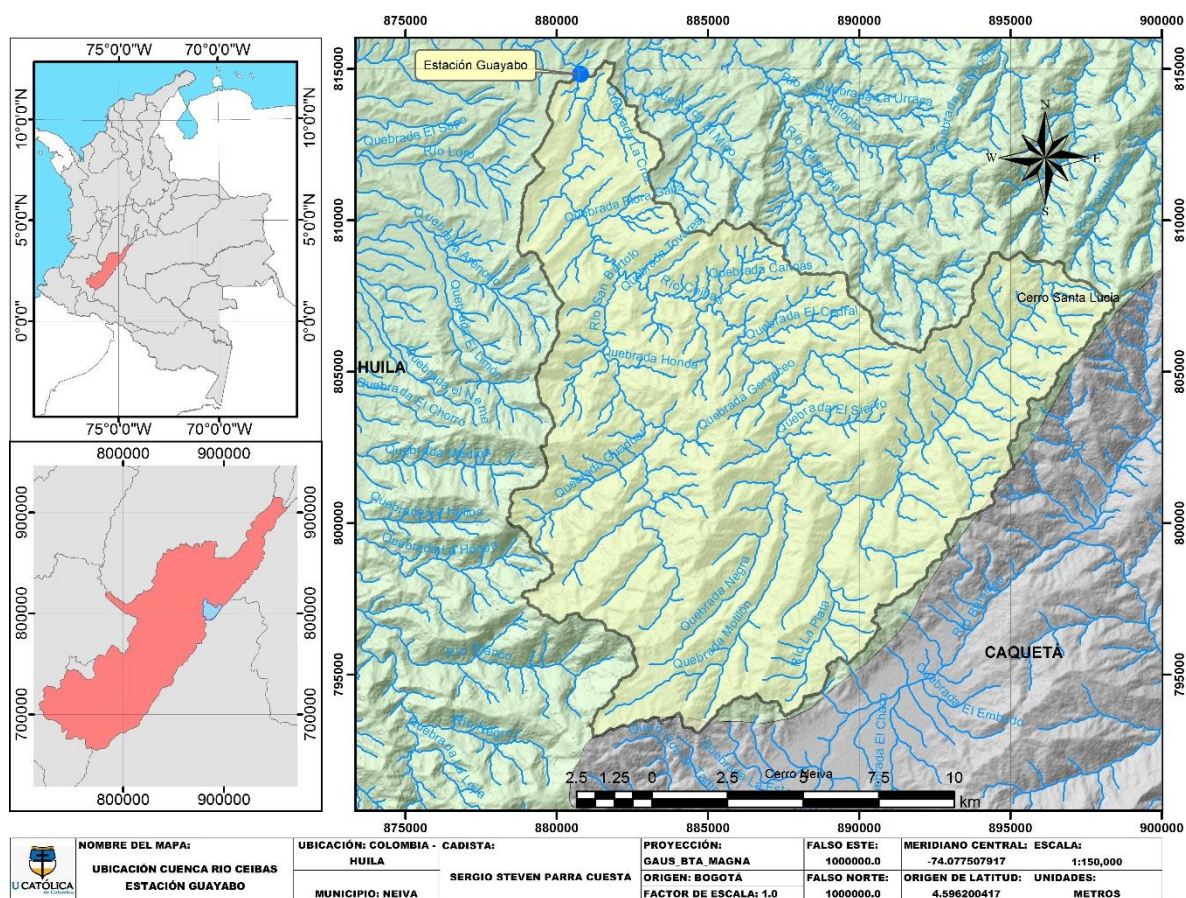
**Bosques y aéreas seminaturales (46.37%):** el bosque natural y seminatural es un considerable porcentaje de la cuenca, donde el 20.39% son bosques densos y se encuentran en la parte alta de la cuenca y cerca al nevado del Tolima, pero no hay en la parte media y baja. Se encuentran algunos bosques que protegen los ríos, el cual comprende el 9.47% y puede ayudar a disminuir la evaporación de los mismos.

**Superficies de agua (0.09%):** únicamente comprende el sitio en la que hay una lámina de agua incluida el área circundante donde pasa el río y superior a los 50 metros en su sección transversal, esto se observa en la parte baja de la cuenca.

## **2.2 Cuenca del río las Ceibas**

El punto de cierre de esta cuenca se encuentra en la estación limnimétrica El Guayabo, ubicado entre las veredas Ceibas Afuera y Platanillal, ciudad de Neiva en la latitud  $2^{\circ}55'16''$  y longitud  $-75^{\circ}8'58.8''$ . Se tomó esta estación al ser la más lejana para tomar mayor área de la cuenca. Recurriendo al Software ArcGIS 10.5 con las herramientas descritas en la metodología, se realiza lo mismo que lo descrito en la cuenca del río Coello. En la Ilustración 37 se evidencia la ubicación de la cuenca según este punto de cierre.

Ilustración 37 Delimitación cuenca río Ceibas en estación Guayabo



Fuente: Propia

### 2.2.1 Características morfológicas

Se identificaron las siguientes características de la cuenca del río Ceibas hasta la estación limnimétrica Guayabo:

Área ( $A$ ):  $224.24 \text{ km}^2$

Perímetro ( $P$ ):  $91.49 \text{ km}$

Longitud de la cuenca ( $L$ ):  $22.21 \text{ km}$

Ancho de la cuenca ( $B$ ):

$$B = \frac{224.24 \text{ km}^2}{22.21 \text{ km}} = 10.10 \text{ km}$$



Factor de forma de Horton ( $k_f$ ):

$$k_f = \frac{224.24 \text{ km}^2}{(22.21 \text{ km})^2} = 0.455$$

De acuerdo con Lux (Lux 2014) y al factor de forma de Horton hallado anteriormente, que al tener un valor bajo, esta menos sujeta a crecientes, pero cabe resaltar que se debe realizar un análisis de suelos de la cuenca.

Coeficiente de Compacidad ( $k_c$ ):

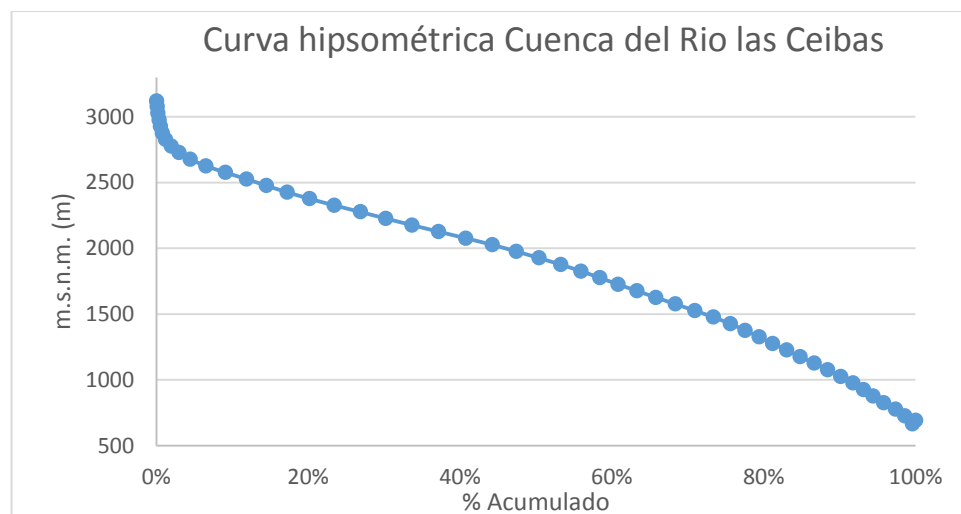
$$A = \pi * R^2 \rightarrow R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \rightarrow R = \sqrt{\frac{224.24 \text{ km}^2}{\pi}} = 8.45 \text{ km}$$

$$k_c = \frac{91.49 \text{ km}}{2 * \pi * 8.45 \text{ km}} = 1.723$$

Teniendo en cuenta lo dicho por Lux (Lux 2014) y el coeficiente de compacidad hallado anteriormente, se obtiene una cuenca oval, oblonga a rectangular, esto quiere decir que la cuenca no hay mucha concentración de agua, esto debido a que está alejado de la unidad.

Curva hipsométrica: con ayuda de los SIG se construyó la curva hipsométrica de la Grafica 16, según (Lux 2014) esta pertenece a una cuenca en la fase de equilibrio o etapa madura, es decir que la erosión de la cuenca se encuentra en un nivel medio, donde no se ha transportado demasiado material.

Grafica 16 Curva hipsométrica cuenca del rio las Ceibas



Fuente: Propia

Se puede concluir según Lux (Lux 2014) se tiene una cuenca en equilibrio, esto debido a que se tiene una pendiente aproximadamente constante en el centro y final de la curva hipsométrica.

## 2.2.2 Características hidrológicas

El río Ceibas nace desde el cerro de Santa Licia, en el norte de la cuenca, desciende hasta que el río la Perla y la quebrada Motilón desembocan en este. Toda esta área se encuentra protegida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible en la reserva forestal protectora nacional cuenca del río las Ceibas. Más adelante se vierte el río San Bartolo, a partir de este río la cuenca toma una forma cuello de botella, pasando por la estación Guayabo y continua así hasta pasar por la ciudad de Neiva capital del departamento del Huila, de este importante río se designa agua para surtir esta importante ciudad, más aún surte a distintos cultivos en la zona. La cuenca continua en una forma alargada, pasando a través de la ciudad de Neiva, dentro de la ciudad, el río está acanalado con una estructura hidráulica que disipa la energía del agua mientras atraviesa la ciudad, antes de terminar en el río Magdalena.

## 2.2.3 Características meteorológicas

### 2.2.3.1 Estaciones climáticas utilizadas

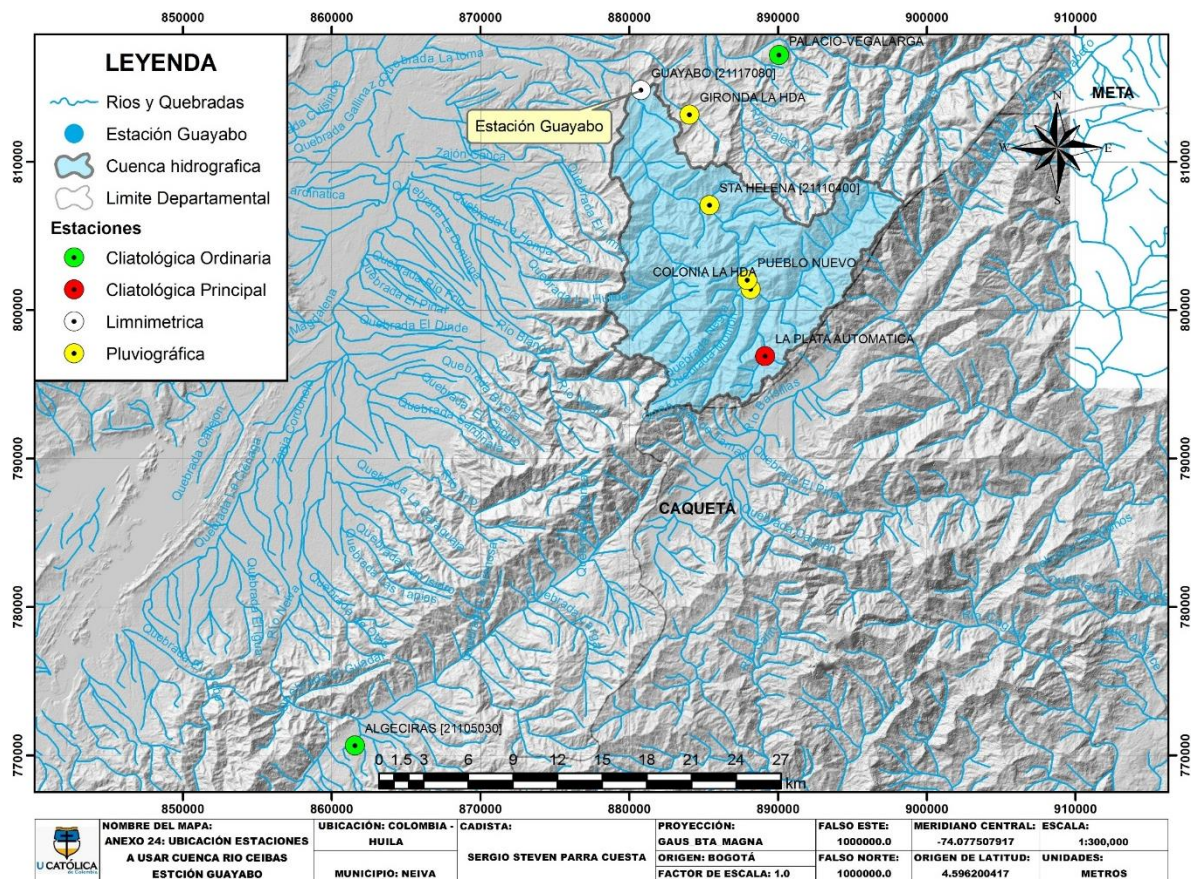
En cercanías a la cuenca se encontraron numerosas estaciones de todo tipo, pero seleccionando por polígonos de Thiessen se tomaron 8 estaciones mostradas en la Tabla 4, de las cuales la estación La Plata Automática no se suministró datos por parte del IDEAM. Para velar con la falta de información en la única estación climática ordinaria Palacio – Vegalarga se solicitó información a la estación climática ordinaria Algeciras, la cual se encuentra a una distancia de 40 kilómetros de la cuenca, a su vez ubicándose a una altura acorde con la cuenca, este se puede apreciar en la Ilustración 38.

Tabla 4 Estaciones meteorológicas utilizadas en la cuenca del río las Ceibas

Código	Nombre	Tipo	Categ.	Corriente	Depto	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud	Fecha inst.	Fecha reg. Ult	Uso
21105030	ALGECIRAS [21105030]	CON	CO	NEIVA	HUILA	ALGECIRAS	2°31'18.1"	-75°19'20.1"	1155	15/04/1971	21/06/2015	Clima
21110410	COLONIA LA HDA	CON	PG	CEIBAS	HUILA	NEIVA	2°48'0"	-75°5'0"	2100	18/06/1983	30/06/1994	Prec. Media
21110430	GIRONDA LA HDA	CON	PG	CEIBAS	HUILA	NEIVA	2°54'22.1"	-75°7'13.6"	1060	18/06/1983	31/10/2017	Prec. Media
21117080	GUAYABO [21117080]	CON	LM	CEIBAS	HUILA	NEIVA	2°55'16"	-75°8'58.8"	650	15/10/1976	31/12/2015	Caudal
21115170	LA PLATA AUTOMATICA	AUT	CP	LAS CEIBAS	HUILA	NEIVA	2°45'32.9"	-75°4'28.4"	2101	20/07/2005	-----	Ninguno
21115100	PALACIO-VEGALARGA	CON	CO	FORTALECILLAS	HUILA	NEIVA	2°56'33.5"	-75°3'59"	1100	11/10/1971	31/12/2016	Clima
21110130	PUEBLO NUEVO	CON	PG	CEIBAS	HUILA	NEIVA	2°48'19.8"	-75°5'7.2"	1580	01/10/1985	31/10/2012	Prec. Media
21110400	STA HELENA [21110400]	CON	PG	CEIBAS	HUILA	NEIVA	2°51'4.1"	-75°6'29.5"	1160	18/06/1983	30/11/2017	Prec. Media

Fuente: (IDEAM 2014)

Ilustración 38 Ubicación de estaciones climáticas usadas en la cuenca del rio las Ceibas



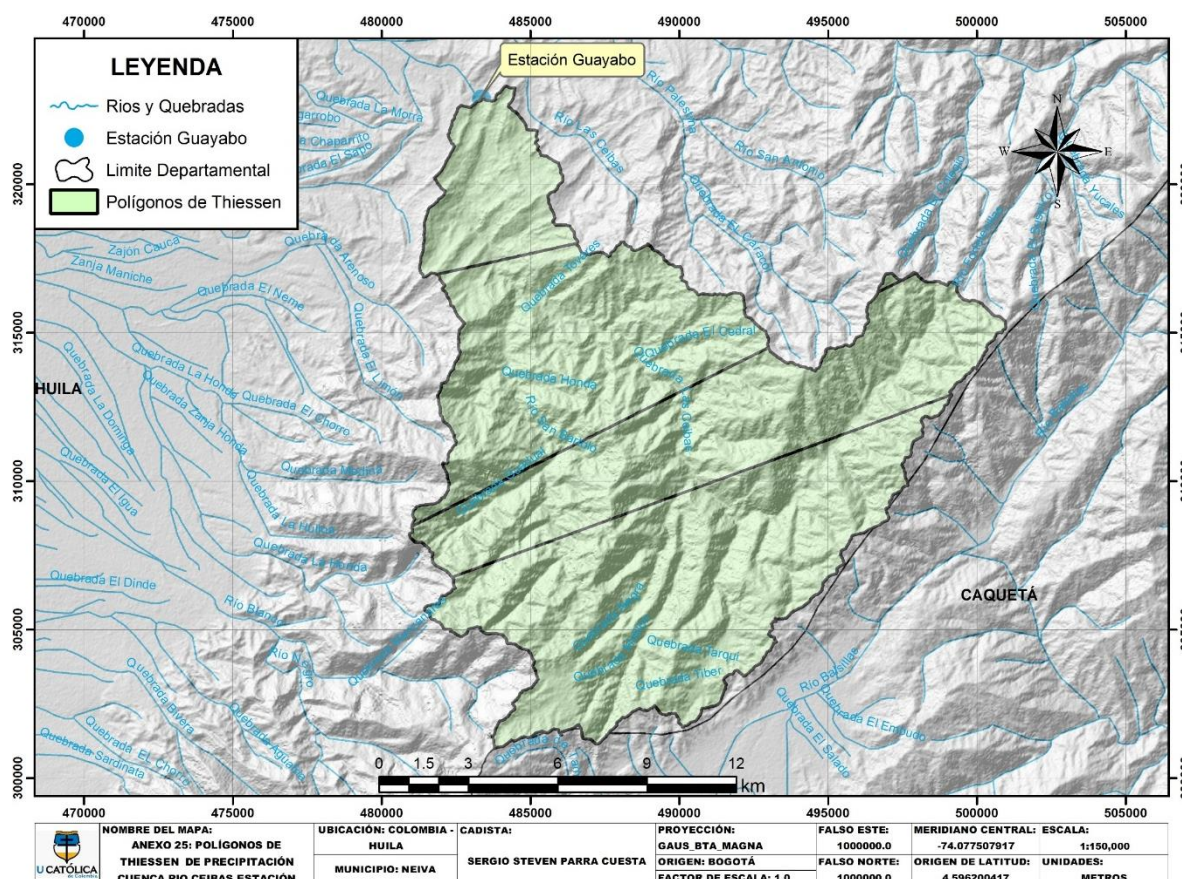
Fuente: (IDEAM 2014)

### 2.2.3.2 Comportamiento climático de la zona

La descripción climática de la cuenca se toma solo de la estación Palacio – Vegalarga, al ser la más cercana a la cuenca, esta cuenta con información intermitente desde enero de 1979 hasta diciembre de 2016. Para la precipitación se lleva a cabo con 4 estaciones con la distribución de los polígonos de Thiessen tal se muestra en la Ilustración 39.



Ilustración 39 Distribución de los Polígonos de Thiessen de estaciones pluviométricas en la cuenca del rio las Ceibas

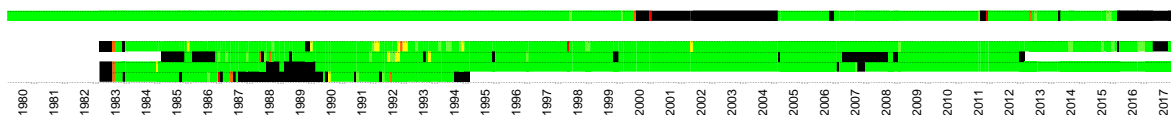


Fuente: Propia

#### 2.2.3.2.1 Disponibilidad de información

El periodo de tiempo de la precipitación se restringe entre el 18 de junio de 1983 hasta el 31 de diciembre de 2015, esto se especificó por la Ilustración 40, en la parte superior se encuentra la disponibilidad de datos de caudal de la estación Guayabo, mientras que en el grupo de abajo esta la disponibilidad de datos de las cuatro estaciones de precipitación. La fecha de disponibilidad de información en la estación Guayabo abarca desde el 1 de enero de 1980 hasta el 31 de diciembre de 2015, al contar con más datos que en el río Coello se limita por los datos de precipitación, los cuales inician específicamente el 18 de junio de 1983 en la estación Sta Helena y por ello es imposible usarlos por la falta de información. Después del 2015 a pesar de existir datos de precipitación, son imposibles de usar porque la información de caudal se encuentra limitado hasta finales de 2015. Entre el 15 de mayo del 2000 y el 1 de enero de 2005 no hay registro alguno de información de caudal, dando una limitación en la elección de los periodos de calibración y validación.

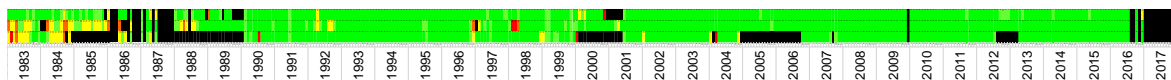
Ilustración 40 Línea de tiempo de datos disponibles de precipitación y caudal  
cuenca del rio las Ceibas



Fuente: propia

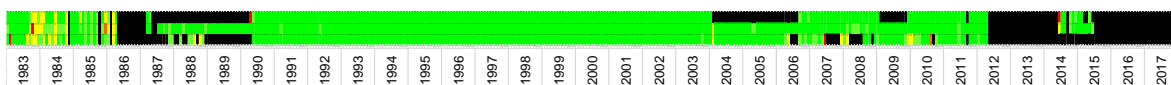
Para los datos climáticos disponibles en la estación Palacio – Vegalarga se encuentran los datos requeridos para calcular de manera correcta la ETo, sin embargo dada la Ilustración 41 los datos de temperatura mínima, media y máxima son escasos entre los años de 1983 y 1990 se hace necesario de tomar otra estación para complementar esta información faltante, en específico la estación Algeciras, la cual contiene información en algunos espacios faltantes dada la Ilustración 42, aun así tomando esta medida no se logra complementar la información faltante, por ello se genera lo dicho en el punto 3 del título 1.8.1.3.4 para obtener así todos los datos diarios de ETo.

Ilustración 41 Línea de tiempo de datos disponibles de temperatura estación  
Palacio – Vegalarga cuenca del rio las Ceibas



Fuente: Propia

Ilustración 42 Línea de tiempo de datos disponibles de temperatura estación  
Algeciras cuenca del rio Ceibas

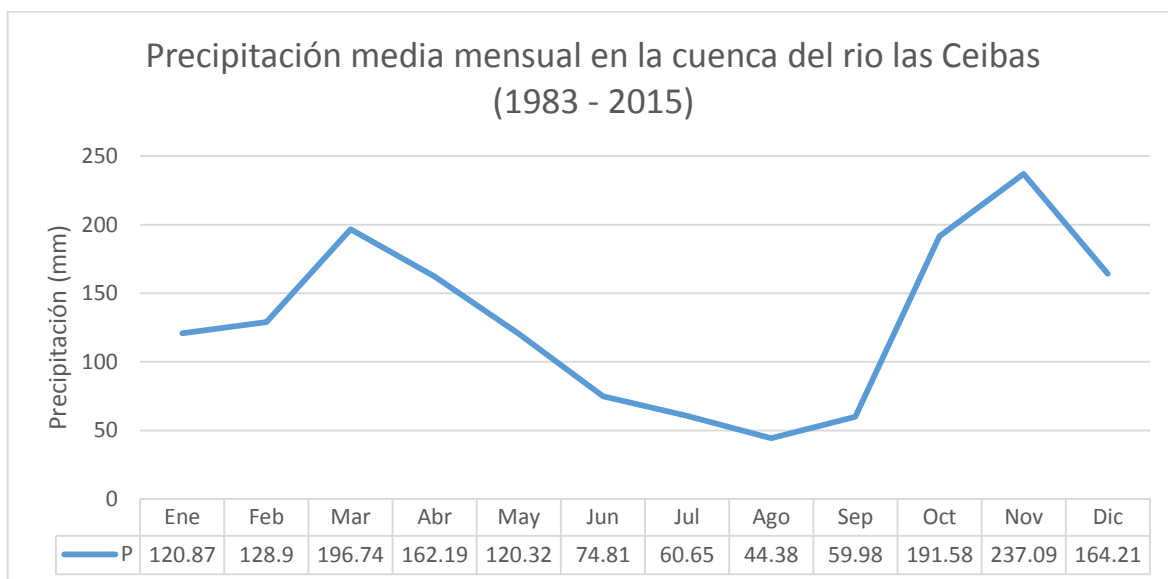


Fuente: Propia

### 2.2.3.2.2 Precipitación

En esta cuenca al solo contar con 4 estaciones pluviométricas no se realizan mapas de isoyetas. De la Grafica 17 se observa un régimen de precipitación bimodal, con una precipitación baja en los meses de enero, febrero, junio, julio, agosto y septiembre identificando el mes de agosto como el más seco, al tener una precipitación de solo 44.38 mm, así mismo una alta precipitación en los meses de marzo, octubre, noviembre y diciembre con una alta precipitación en el mes de noviembre que llega hasta los 237.1 mm de media.

Grafica 17 Precipitación media mensual cuenca del rio las Ceibas

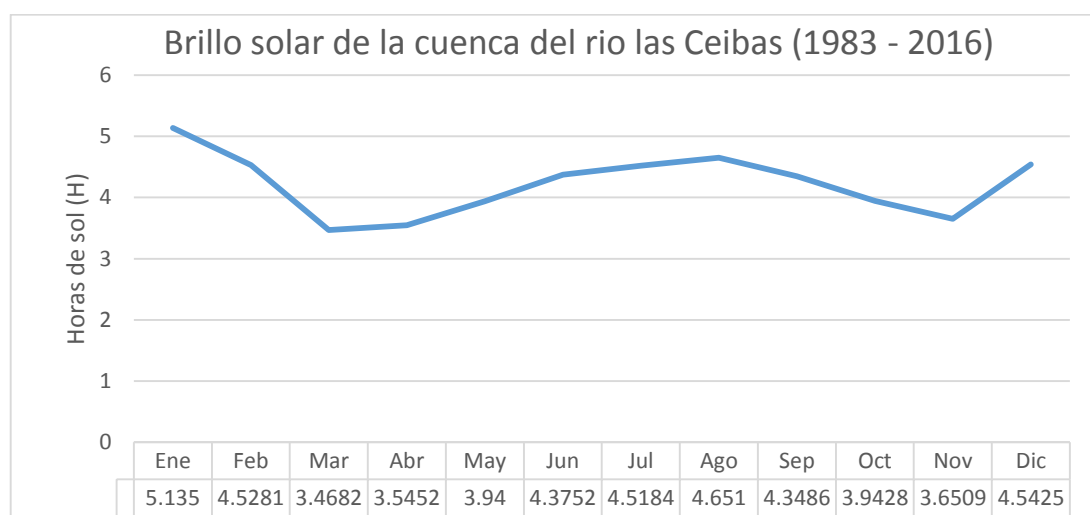


Fuente: Propia

#### 2.2.3.2.3 Brillo solar

El comportamiento del brillo solar varía contrario a la conducta de la precipitación, ya que en los meses donde se tiene mayor precipitación es donde hay menores horas de sol, se obtiene un promedio mensual mínimo en el mes de marzo de 3.468 horas y un máximo en el mes de enero con 5.135 de media, esto según la Grafica 18.

Grafica 18 Brillo solar media mensual cuenca del rio las Ceibas

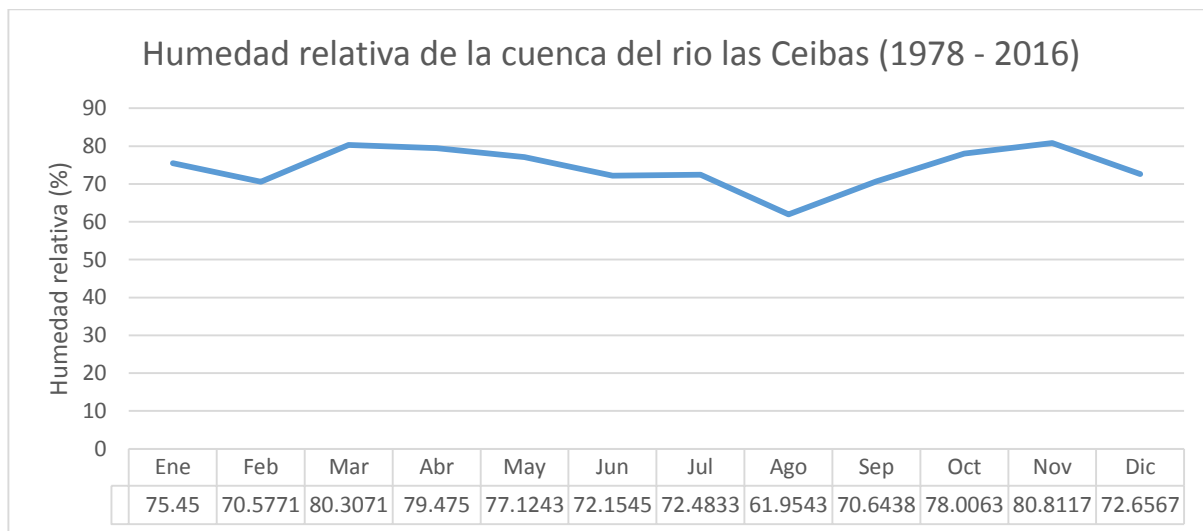


Fuente: Propia

#### 2.2.3.2.4 Humedad relativa

Es variable durante el año, con un comportamiento de igual manera al de la precipitación, guarda esta relación por el aumento del agua sobre la superficie y en consecuencia es lógico que aumente la humedad relativa de esta, a causa de la Grafica 19 se toma esta conclusión.

Grafica 19 Humedad relativa media mensual cuenca del rio las Ceibas

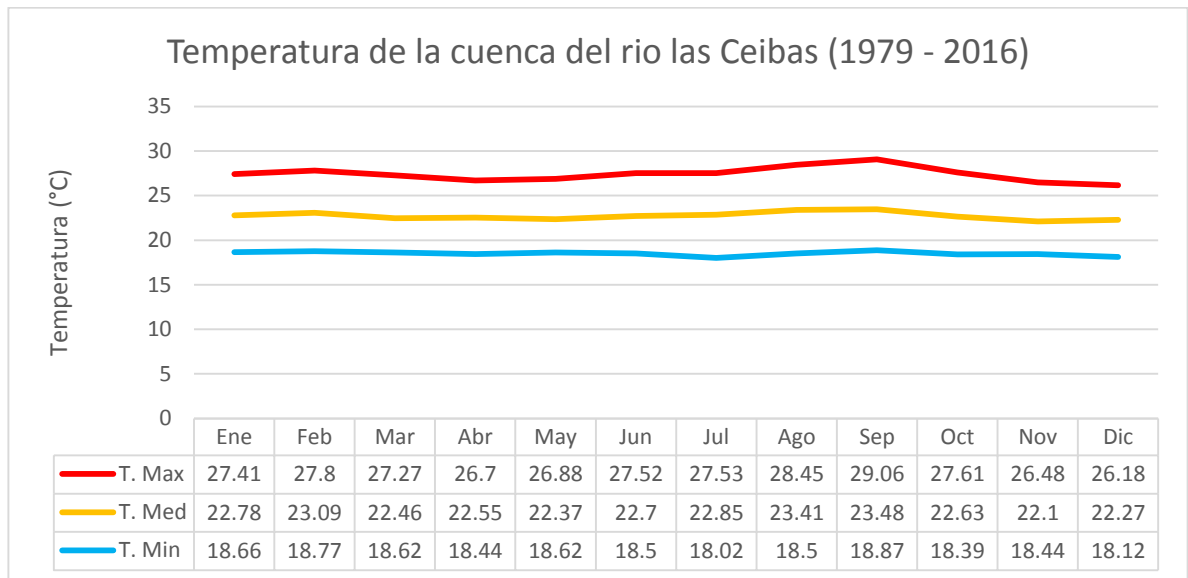


Fuente: Propia

#### 2.2.3.2.5 Temperatura

Las temperaturas corresponden a un lugar de clima cálido. Hay pocas variaciones en la temperatura de esta con referente al resto del año. El promedio mensual de cada mes se observa en la Grafica 20:

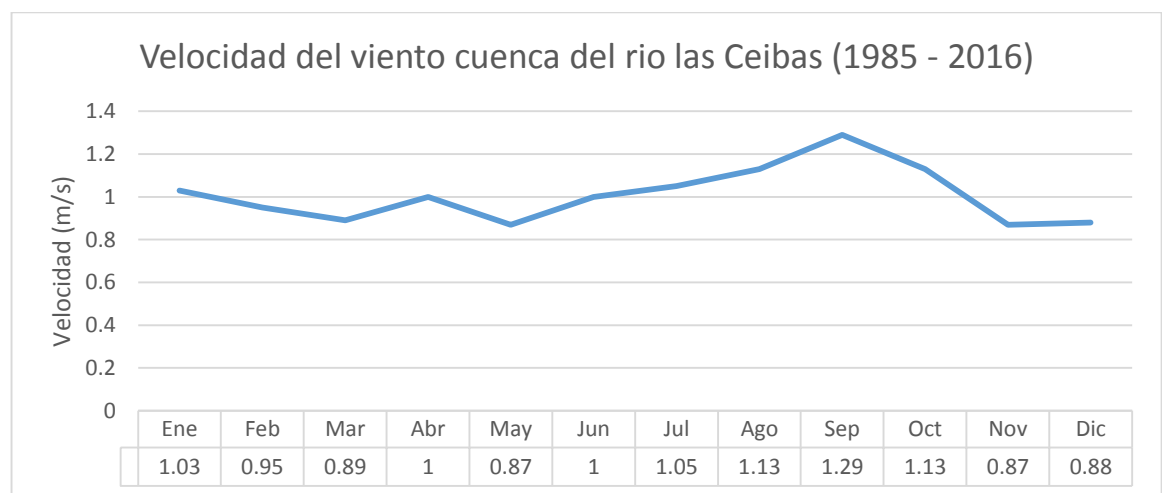
Grafica 20 Temperatura media mensual cuenca del rio las Ceibas



Fuente: Propia

#### 2.2.3.2.6 Velocidad del viento

Grafica 21 Velocidad del viento media mensual cuenca rio Ceibas



Fuente: Propia

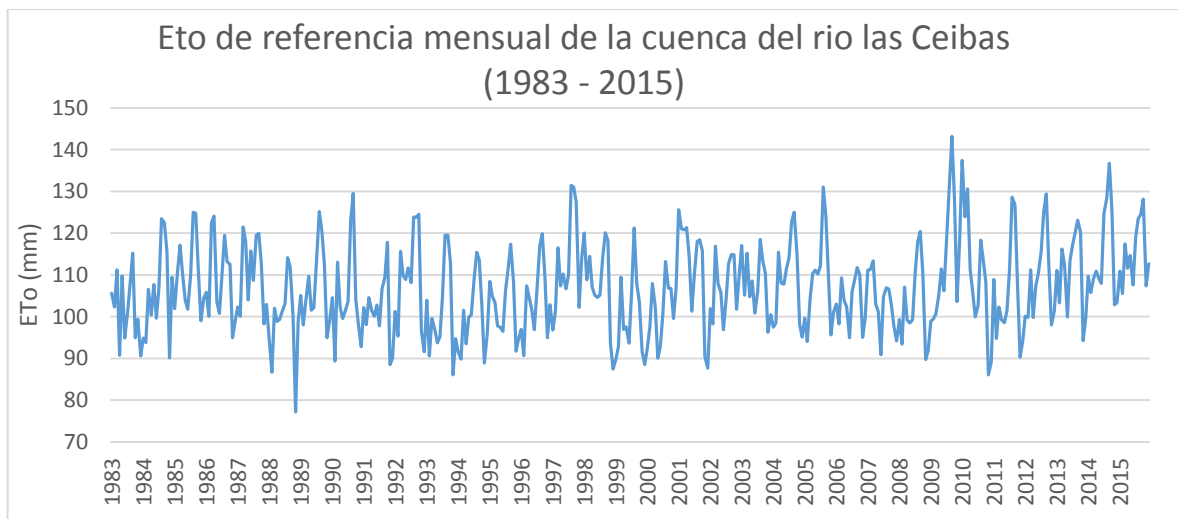
Dicho en la Grafica 21, el comportamiento de la velocidad es variable en todo el año, no guarda relación con las demás características climáticas. El medio mensual dado en este grafico se valió para completar los datos faltantes para el cálculo de la ETo.



### 2.2.3.3 Evapotranspiración de referencia

De manera semejante que se calcula la ETo para la cuenca del río Coello, para esta se calcula de la misma manera, pero para esta cuenca solo se tiene la estación Palacio – Vegalarga y los datos faltantes de temperatura afectan directamente los cálculos de la ETo, y como se dijo anteriormente para solventar la falta de datos se tomó la estación Algueciras. Realizando el proceso descrito en la metodología se llega a la Gráfica 22 en que se observa la ETo mensual obtenida, la dispersión de los datos es muy variable en el tiempo.

Gráfica 22 ETo mensual cuenca del río las Ceibas

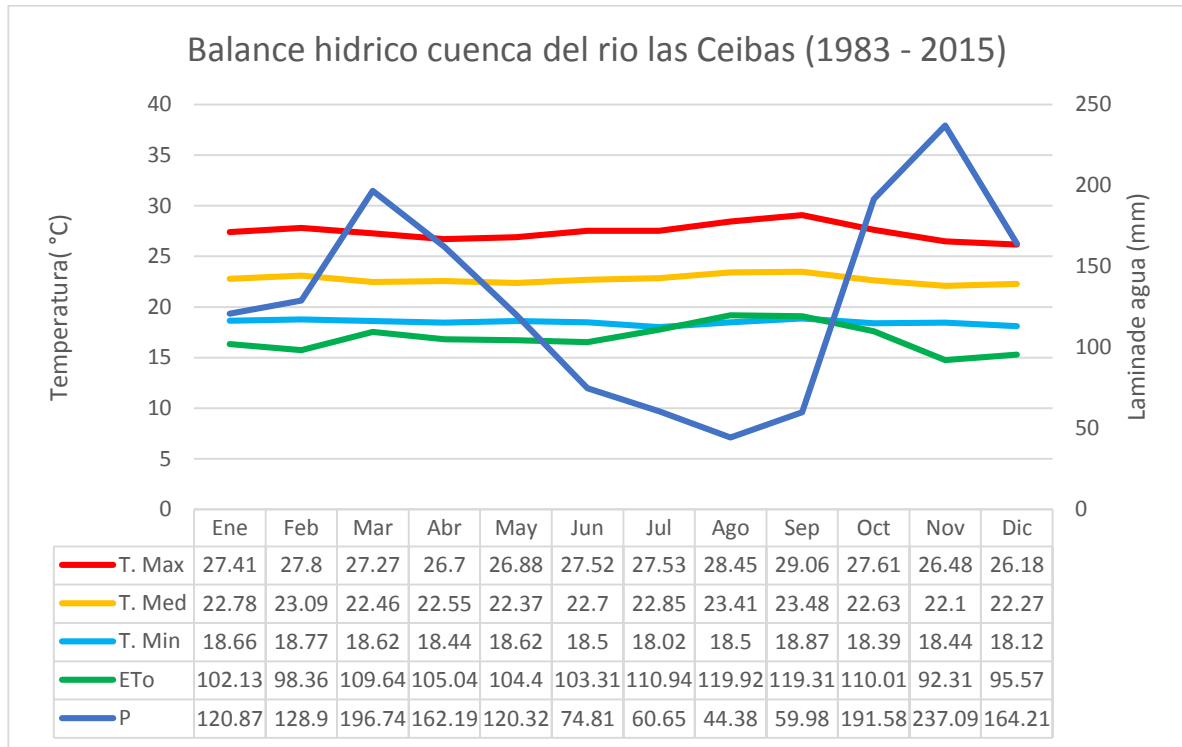


Fuente: Propia

### 2.2.3.4 Balance hídrico de la cuenca

En la Gráfica 23 se identifica un periodo de déficit que va en los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre al superar la tasa de ETo media de la cuenca con la precipitación que llega a la misma, pero con una abundancia de precipitación en el restante del año, siendo ideal para la extracción de agua, no obstante hay que considerar los meses que se tienen de déficit para planificar los límites de extracción de agua al río y conservar la biodiversidad natural de la cuenca.

Grafica 23 Balance hídrico cuenca del rio las Ceibas



Fuente: Propia

#### 2.2.3.5 Registros de caudal de la estación Guayabo

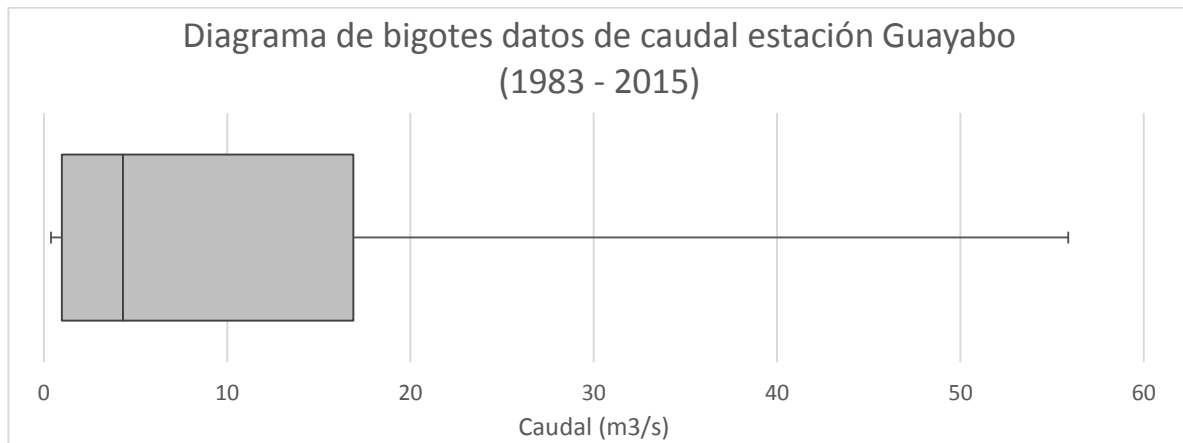
Los datos de caudal de la estación limnimétrica Guayabo suministrados por el IDEAM corresponden desde el 1 de enero de 1980 hasta el 31 de diciembre de 2015. Por limitaciones de los registros de precipitación, los siguientes cálculos corresponden al periodo desde el 1/01/1983 hasta el 31/12/2015. el caudal medio y la desviación estándar de los datos de caudal son los siguientes:

$$\bar{x} = 4.9 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S = 3.11 \text{ m}^3/\text{s}$$

La Grafica 24 es un diagrama de bigotes donde representa el  $P_{01}$  y el  $P_{99}$  de los caudales registrados, a pesar de tener una dispersión de los datos pequeña, se representa principalmente a una desviación estándar relativamente pequeña, además de que la media no es muy alta.

Grafica 24 Diagrama de bigotes de caudal estación Guayabo

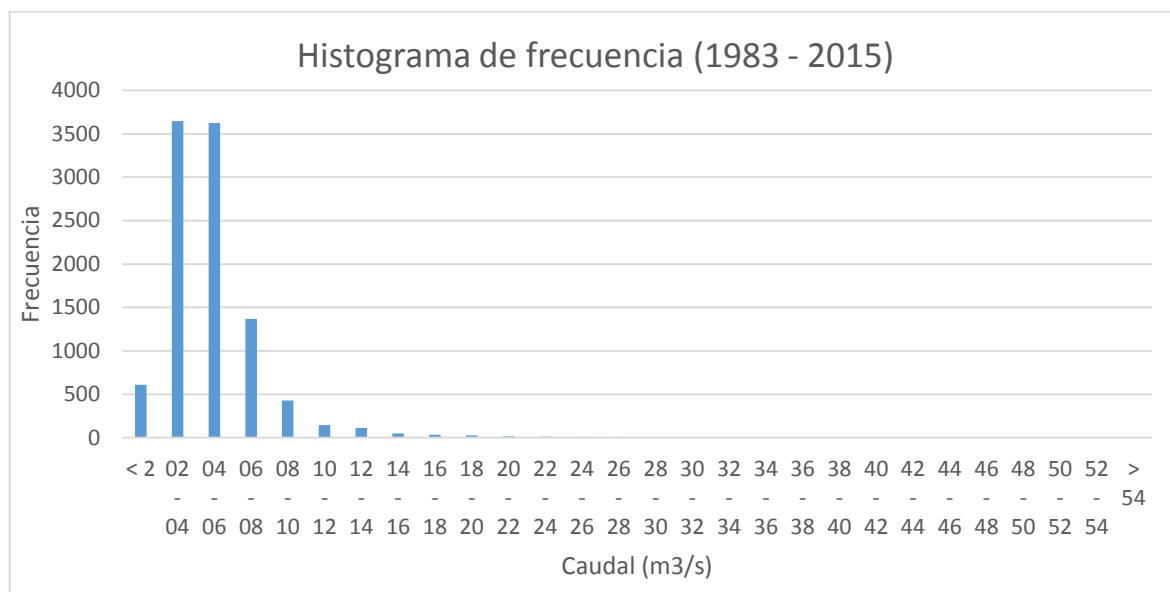


Fuente: Propia

Lo anterior se refleja en el histograma de la Grafica 25 generado para estos datos, en la base de datos se resaltan los datos mayores al  $P_{99}$  el cual es de  $16.89 \text{ m}^3/\text{s}$  y estos datos representan significativamente caudales altos generados por la cuenca, esto se justifica en el hidrograma de la Grafica 26, donde los picos de precipitación concierne a un caudal producido, pero los caudales entre el año de 2005 y 2015 aunque responden a la precipitación se denota mayor amortiguación de la precipitación por parte de la cuenca, con caudales casi que constantes cuando ocurren varios picos de precipitación y contrario a lo que si se observó en datos antes del 2000. Otro punto a destacar de la Grafica 26 son los datos que están en el año 2000, hay caudales que son constantes a lo largo de varios días consecutivos, pero no se identifica con la precipitación que cae en la cuenca, esta información varia en estos periodos, además que hay precipitaciones altas que no se ven reflejadas en el caudal.

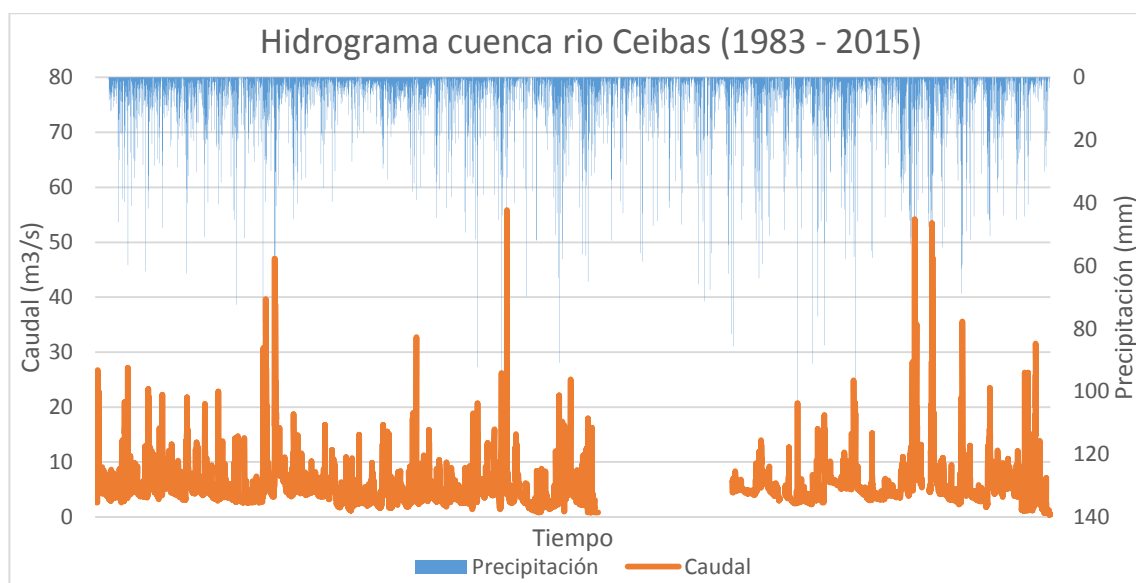
Para concluir de lo dicho anteriormente, los caudales pico representan lo producido por la cuenca y estos no fueron eliminados en la calibración de los modelos, pero si fueron eliminados los datos correspondientes a los tomados durante el año 2000.

Grafica 25 Histograma de frecuencia del caudal estación Guayabo



Fuente: Propia

Grafica 26 Hidrograma cuenca del rio las Ceibas



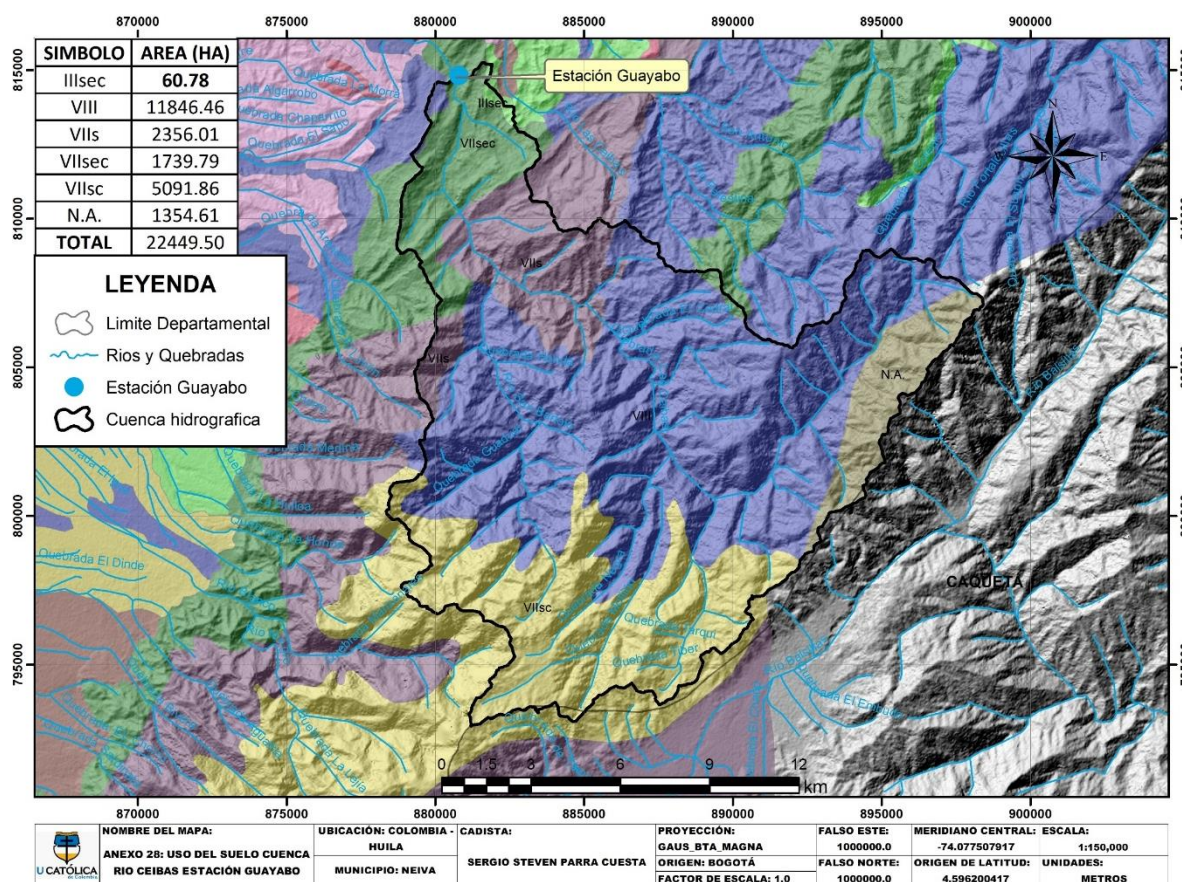
Fuente: Propia

## 2.2.4 Características fisiográficas

### 2.2.4.1 Clasificación de la tierra por capacidad de uso

De la Ilustración 43 y del documento "Estudio general de suelos del departamento del Huila" realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (Instituto Geográfico Agustín Codazzi 1994) y el shapefile HUILA\_CAPACIDAD\_100K (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [sin fecha]) donde se localizan los distintos suelos, se puede concluir a grandes rasgos lo siguiente:

Ilustración 43 Mapa uso del suelo de la cuenca del río las Ceibas



Fuente: (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [sin fecha])

**Clase VIII (52.77%):** este cubre gran parte de la cuenca, y sobresale en la parte media y alta de la cuenca, este cuenta con limitaciones de diversos factores, como el clima, el suelo, relieve, erodabilidad, afloramiento de roca y suelos de roca, por ende, no es apto para cultivo, este se utiliza para conservación ecológica.

**Clase VIIsc (22.68%):** se encuentra en la parte alta de la cuenca, cuenta con un clima medio, pero cuenta con bajas precipitaciones, es transición de zona húmeda



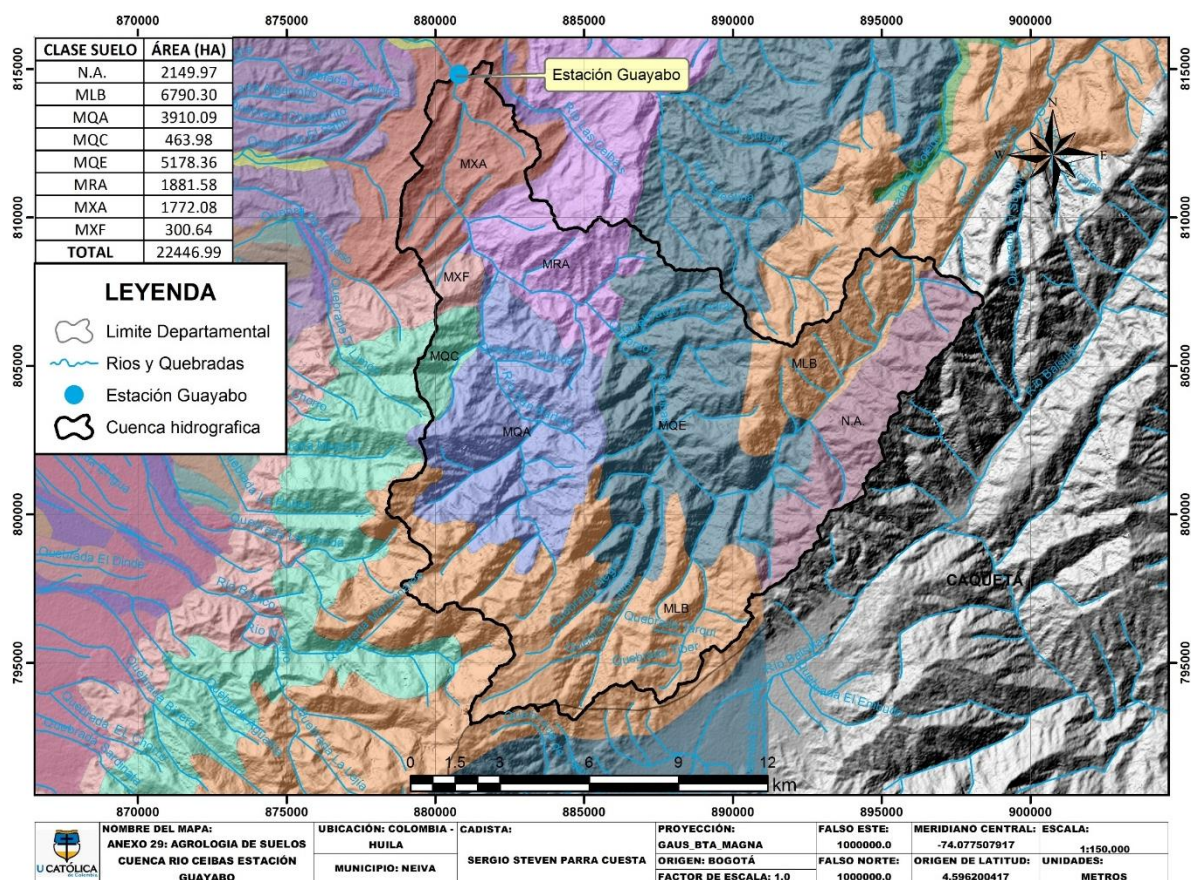
a seca. Esta zona cuenta con erosión laminar y desprendimientos de roca moderado, debido a pendientes altas.

El resto de la cuenca cuenta con suelos que se utiliza para la conservación del ambiente, para la reforestación, ya que debido al relieve accidentado y erosión laminar y desprendimientos del suelo en algunos sectores no es recomendable cultivar.

#### 2.2.4.2 Agrología de suelos

De la Ilustración 44 y del documento "Estudio general de suelos del departamento del Huila" realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (Instituto Geografico Agustin Codazzi 1994) y el shapefile HUILA\_SUELOS\_100K (Instituto Geografico Agustin Codazzi [sin fecha]), se puede concluir a grandes rasgos lo siguiente:

Ilustración 44 Mapa agrología del suelo de la cuenca del rio las Ceibas



Fuente:(Instituto Geografico Agustin Codazzi [sin fecha])

**MLB (30.25%):** se encuentra en la parte alta de la cuenca, esta zona se encuentra cubierta con cenizas volcánicas y una erosión moderada. El suelo es superficial a profundo, son ricos en materia orgánica, pero de baja fertilidad.

A grandes rasgos, la cuenca se encuentra cubierta con suelos de origen ígneo o metamórfico, a excepción del suelo MLB, con una topografía ondulada a alta. Todos tienen una fertilidad baja, debido a que en algunas zonas el suelo es ácido. Cierta superficie se encuentra compuesta por suelos con areniscas y lutitas, los cuales le dan una propiedad a ser bien drenados, estos se encuentran en la parte baja de la cuenca, muy cerca al punto de cierre.

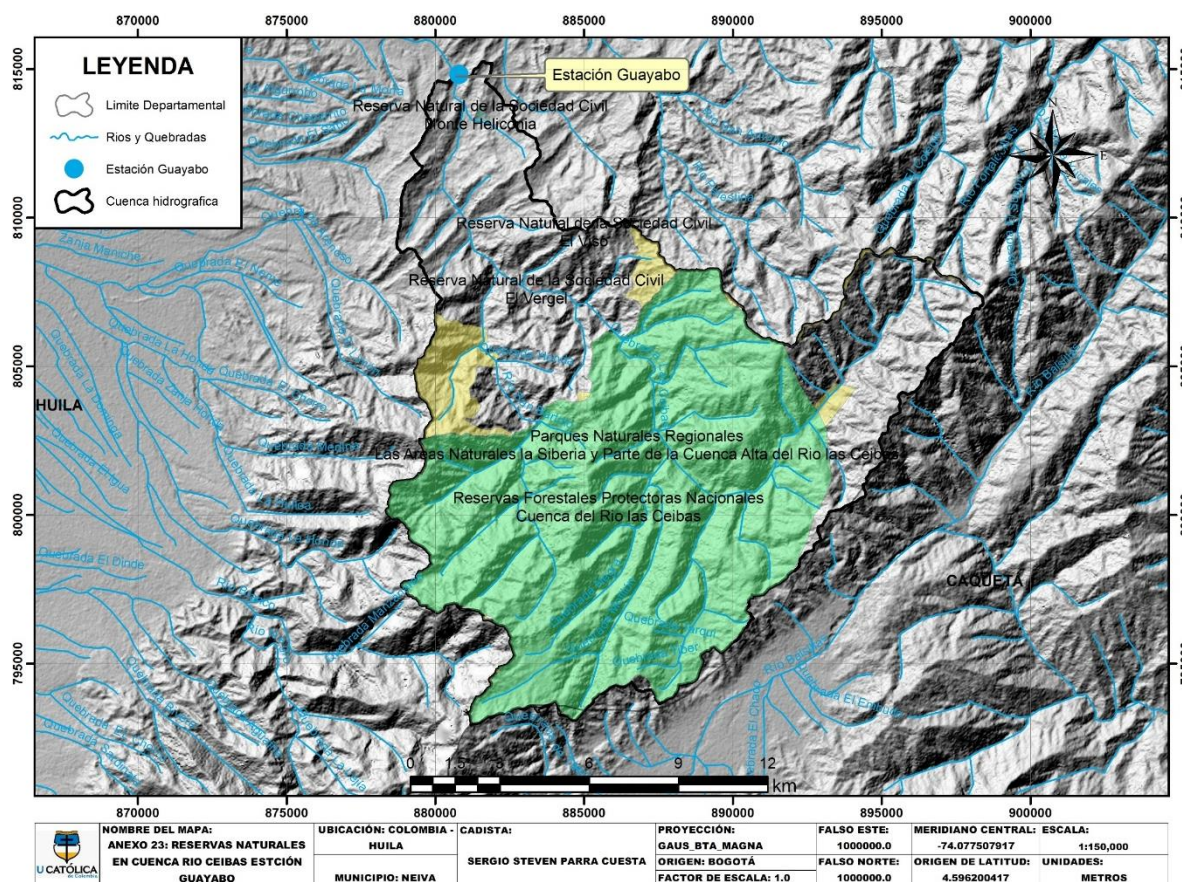
## 2.2.5 Características ambientales

### 2.2.5.1 Reservas naturales

El mapa de la ubicación de las reservas naturales se encuentra en la Ilustración 45 con referencia a los shapefiles facilitados por el SIAC (Sistema de Información Ambiental de Colombia [sin fecha]). La parte alta de la cuenca es catalogado como Reservas forestales protectoras nacionales, regulado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible con nombre Cuenca del Río las Ceibas, además parte de ella también es Parque Natural Regional, con el nombre de Las Áreas Naturales la Siberia y Parte de la Cuenca Alta del Río las Ceibas, este es un parque natural de tamaño considerable, abarcando como bien dice su nombre, parte de la cuenca del río las Ceibas, como también estar conforme con otros sectores al norte de la cuenca, esta se encuentra regulada por la CAM. Esta estrategia es muy bien recibida por el bienestar de la cuenca, al permitir flora natural para la generación de agua y preservar la flora que se encuentra allí, así mismo estas son las dos reservas más grandes de la cuenca. En la ciudad de Neiva hay distintas campañas que promueven la preservación y cuidado de la cuenca del río Ceibas.



Ilustración 45 Mapa reservas naturales de la cuenca del rio las Ceibas



Fuente: (Sistema de Información Ambiental de Colombia [sin fecha])

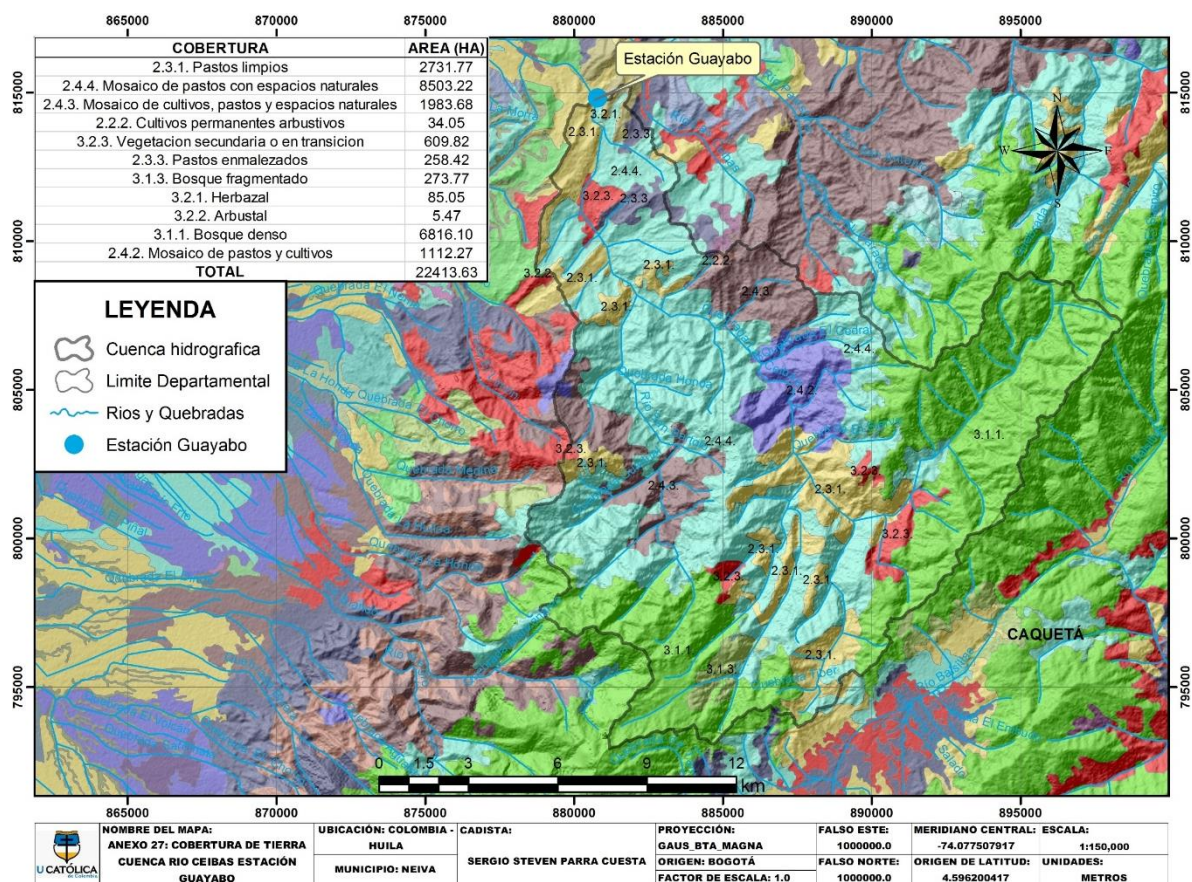
Se encuentran reservas naturales más pequeñas, las cuales son parques naturales en la mitad de la cuenca, a comparación del tamaño de la cuenca.

#### 2.2.5.2 Cobertura de suelos en la cuenca

Del mapa en la Ilustración 46 se crea con ayuda del shapefile Cobertura\_Tierra\_2010\_2012 que contiene la ubicación geográfica de cobertura (Sistema de Información Ambiental de Colombia [sin fecha]) y del documento "Leyenda nacional de coberturas de la tierra" realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 2010), se puede concluir a grandes rasgos lo siguiente:



Ilustración 46 Mapa cobertura del suelo de la cuenca del rio las Ceibas



Fuente: (Sistema de Información Ambiental de Colombia [sin fecha])

**Territorios artificiales (0.0%):** en el mapa no hay presencia de cabeceras municipales.

**Territorios agrícolas (65.26%):** de gran abundancia en la parte media y baja de la cuenca, donde el 37.95% de mosaico de pastos con espacios naturales esta en mayor cantidad comparado con toda la cuenca, este se encuentra a lo largo de toda la cuenca, mayoritariamente en el centro y parte baja de la cuenca. Los pastos limpios están distribuidos por toda la cuenca, pero con muy poca presencia, corresponden únicamente al 12.19% de la cuenca, pudiendo concluir de lo anterior que en la cuenca podría haber una penetración del agua alta por la poca presencia de pastos.

**Bosques y aéreas seminaturales (34.74%):** esta no pueda que no sea de un porcentaje alto, pero se puede destacar que el bosque denso tiene un porcentaje del 30.42% y cubre expansivamente la parte alta de la cuenca, cerca de los límites con el Caquetá, esto es bueno para la cuenca, ya que se mantiene protegida los

sectores importantes donde nacen los ríos, evitando la evaporación excesiva de estos.

### 3. Modelos hidrológicos

#### 3.1 Modelo Sacramento

Este es un Tabla 5 modelo formal de simulación continua paramétrico, de acuerdo a lo visto en el capítulo 1.4 . El modelo tiene las siguientes características:

- Formal
- Conceptual
- No lineal
- Invariable en el tiempo
- Agregado
- Procesos continuos

En la Tabla 5 se detallan las distintas variables de ingreso y salida para este modelo, es de aclarar que en la salida de calibración y validación el coeficiente de eficiencia NSE tal lo describe el título 1.8.2.6, este valor compara los resultados dados por el modelo con los datos tomados en campo, además de que según el título 1.8.2.3, el programa muestra distintas graficas de comparación de datos entre los calculados por el modelo y los observados.

Tabla 5 Variables de entrada y salida del modelo Sacramento

Variables de entrada	
Calibración y validación	Simulación
Precipitación ( <i>mm</i> )	Precipitación ( <i>mm</i> )
Evapotranspiración ( <i>mm</i> )	Evapotranspiración ( <i>mm</i> )
Área de la cuenca ( <i>km</i> <sup>2</sup> )	Área de la cuenca ( <i>km</i> <sup>2</sup> )
Caudal ( <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>s</i> )	-
Variables de salida	
Coeficiente de eficiencia (NSE)	Caudal ( <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>s</i> )

Fuente: (Boughton et al. 2003)

Este modelo fue desarrollado por el Joint Federal-State River Forecast Center, National Weather Service, y el State of California Department of Water Resources. Cuenta con dos versiones, una data de 1973, y fue llamada Sistema de Simulación de Corriente de Flujo Generalizada, y una versión apenas variada del año 1976, llamada Sistema de Proyectos de Río del Servicio Meteorológico Nacional.(Ponce 1989)

Teniendo en cuenta la documentación de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) o Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos

(National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA 2002), donde explica el funcionamiento del modelo, dice:

El modelo puede ser utilizado para simular una porción de agua del ciclo hidrológico. Este consiste en un paquete de percolación, almacenaje de suelo-humedad, drenaje, y evapotranspiración, que pretende figurar los procesos hidrológicos importantes de forma consistente y lógico.

El siguiente punto trata sobre los componentes básicos del modelo, para identificarlos planteemos un bloque de suelo aislado en un recipiente, si se deja secar el suelo a las inclemencias del clima, poseería un diferencial en el peso original, dicho hasta aquí supone una disminución de la humedad del suelo, pero este por más tiempo que se deje, tendrá una cierta humedad residual que ni las plantas pueden consumir, lo cual es prácticamente imposible eliminarlo si continuamos con las condiciones dadas. Este nivel aparenta un límite inferior de humedad la cual está enérgicamente unida a las moléculas del suelo, así mismo se supone como permanente en el suelo y no es necesario incluirla como variable en el tiempo.

Por otra parte, si se añade lentamente humedad al bloque de suelo, se percibe una absorción del suelo sin permanecer totalmente saturada, el agua absorbida es de alrededor el 15% en peso del material, a pesar que cambia según el suelo. Esta agua exclusivamente se puede eliminar con evapotranspiración o evaporación a causa del fuerte enlace de las partículas del suelo. Lo anterior se conoce como agua de tensión.

Otro rasgo a tener en cuenta es que, si se tiene suministrada la demanda a tensión, se descubren ciertos vacíos entre las moléculas del suelo que se puede lograr a llenar con agua temporalmente y luego se puede drenar del suelo imaginario se conoce como agua libre, este nombre es dado ya que el agua no se encuentra ligado a las partículas del suelo. Como resultado de lo antepuesto se esboza un problema al representar el suelo en un cálculo efectivo que caracterice la percolación y el drenaje, al controlar todo el proceso de escorrentía.

### 3.1.1 Almacenamiento en zona superior e inferior

Para facilitar el análisis, el suelo es fraccionada en dos: la zona superior toma en cuenta la humedad que se retiene en la intercepción, y zona baja se tiene en cuenta el volumen de humedad del suelo y la acumulación de agua subterránea.

La cuenca es dividida en dos tipos de área: el área permeable, quien es la que produce la escorrentía superficial, pero únicamente cuando la lluvia excede cierta cantidad. Y un área impermeable, el cual produce escorrentía con cualquier cantidad de lluvia.

En la zona permeable, la humedad ingresa en la parte superior, donde se debe cumplir una tensión mínima del suelo antes de empezar a saturarse, este se conoce como Tensión de Agua en la Zona Superior Máxima (o sus siglas en ingles UZTWM). Cuando se cumple la condición anterior, la lluvia empieza a saturar la superficie, dando la capacidad al agua de acumularse entre áreas impermeables y este empieza a drenar al cauce de la corriente (representado por el parámetro PCTIM).

Por otro lado, se precisa es el volumen de agua que se puede mover lateralmente entre el suelo o verticalmente a niveles más profundos del suelo, esta se conoce como Agua Libre de la Zona Superior (o en sus siglas en ingles UZFWM).

Ya dentro del suelo, se debe considerar la tensión y el agua libre. El agua de tensión es el agua que se queda atraída por las partículas del suelo, como rocas y arcilla, esta se encuentra en la zona inferior, y es superior al componente de tensión superficial, es necesario para compensar los requisitos de humedad debido a la atracción molecular entre los suelos secos y húmedos, este se conoce como el Agua de Tensión de la Zona Baja Máxima (o sus siglas en ingles LZTWM).

El agua libre al no estar atraída por las partículas del suelo, entonces el agua puede circular libremente por gravedad y forman las reservas del flujo base. Se considera que el drenaje en la zona inferior cumple la ley de Darcy y en Sacramento se toma como la multiplicación de una conductividad constante por el volumen de agua libre residual, si bien esto teóricamente está bien no se observa el flujo base que se forma en la naturaleza. A no ser de utilizar dos tipos de agua libre: un flujo primario, el cual drena lentamente, y proporciona una base durante largos periodos, y un flujo secundario, el cual complementa la base después de periodos cortos entre lluvias. Es posible combinar estos dos flujos, claro que drenan independientemente uno del otro, de acuerdo a la ley de Darcy, esta división se realiza además para identificar las distintas condiciones encontradas en campo.

### 3.1.2 Distribución de la humedad y flujo interno

Empezando por considerar los almacenamientos además de especificar la repartición de la humedad y el proceso de escorrentía derivado de precipitaciones de distintas proporciones en una cuenca radica en un problema, por tanto un desarrollo lógico que podría simular los procesos de filtración y escorrentía se esclarecen en la Ilustración 47.

Al divisar las precipitaciones esencialmente se consideran dos áreas básicas:

- Una porción permeable de la superficie del suelo
- Una porción impermeable de la superficie del suelo que corresponde a arroyos, lagos, pantanos y otros terrenos impermeables

Para un área permeable se produce escorrentía cuando las lluvias son suficientes lo que conlleva a representar esta área como un almacenamiento, con una humedad inicial y corresponde al Agua de Tensión de la Zona Superior (UZTWM) y mientras este no se llene el agua no podrá moverse de forma lateral o a capas inferiores. En caso contrario, la parte impermeable produce escorrentía ante cualquier intensidad de lluvia.

El Agua Libre de la Zona Superior (UZFWM) se mueve en dos direcciones, de forma horizontal donde genera interflujo y de forma vertical donde depende la cantidad de agua disponible en la zona superior. Por ende, el interflujo es directamente proporcional al agua libre aprovechable luego de filtrarse:

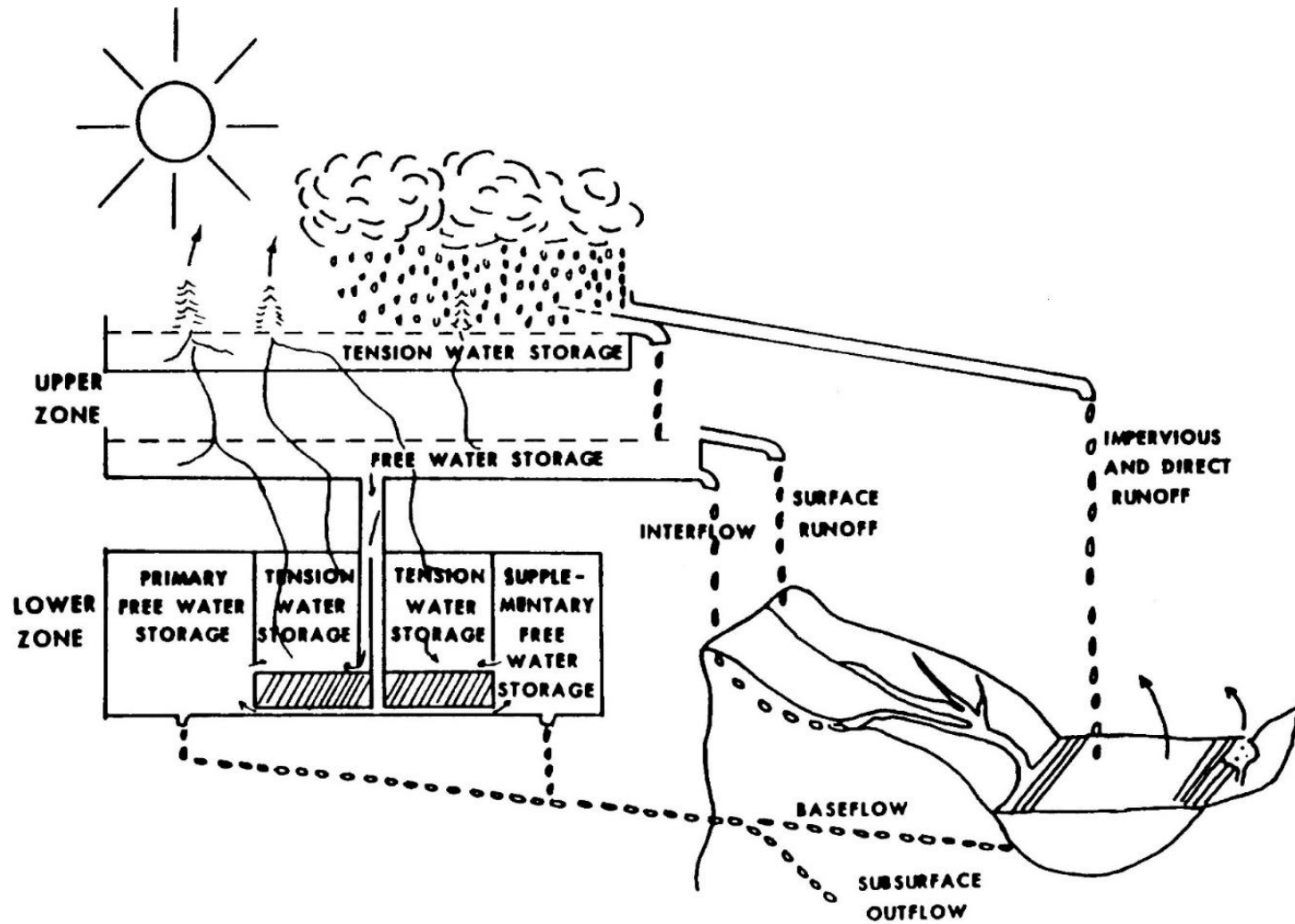
$$Interflujo = UZK * UZFWC \quad (5)$$

Donde:

*UZK* es el factor de agotamiento del Agua Libre de la Zona Superior

*UZFWC* es el volumen de Agua Libre almacenado actualmente en la Zona Superior

Ilustración 47 Modelo sacramento generalizado



Fuente: (National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA 2002)

### 3.1.3 Filtración

El factor de drenaje vertical es moderado por el agua libre superficial y la diferencia de volúmenes considerados en la zona inferior. El agua de la zona superior que desciende se considera como percolación. El flujo horizontal superficial se puede producir solo cuando la tasa de precipitación supera en velocidad la tasa de filtración de agua en capas inferiores. Solamente cuando la precipitación supera la tasa de percolación y llena los almacenamientos superiores se producen la escorrentía superficial, por tanto, es dependiente de la lluvia que cae en la zona y del nivel de aridez que tengan las zonas inferiores.

Para entender mejor el funcionamiento de la percolación se hace necesario entender como es su comportamiento. El Agua de Tensión de la Zona Inferior se encuentra disponible para la interacción con la evapotranspiración. Se fijaron dos almacenamientos de este tipo en la zona inferior, primario y complementario, así mismo constituyen el volumen disponible para el flujo base o flujo de salida subsuperficial que no aparecen en el río.

Este sistema está diseñado con la idea de que la entrega de agua superior a la inferior está limitada a una demanda de percolación, en vista de que se sature la zona inferior debe limitarse la cantidad que agua que percola, por ello se calcula esta tasa distinguida como *PBASE* con la ecuación (6) donde se tiene en cuenta las dos zonas del suelo inferior:

$$PBASE = LZFSM * LZSK + LZFPM * LZPK \quad (6)$$

Donde:

*LZFSM* es el almacenamiento de Agua Libre de la Zona Inferior Suplementaria para un flujo base más rápido

*LZSK* es el factor de agotamiento del almacenamiento *LZFSM*

*LZFPM* es el almacenamiento de Agua Libre de la Zona Inferior Primaria para un flujo base más lento

*LZPK* es el factor de agotamiento del almacenamiento *LZFPM*

Dado a que después de los periodos secos se puede comprobar una percolación más alta, y si existe un límite, este será definido en la ecuación (7):

$$Capacida\ de\ Percolacion\ Maxima = PBASE * (1 + ZPERC) \quad (7)$$



Donde  $ZPERC$  es la variable que aumenta el potencial de percolación a partir de un mínimo  $PBASE$  hasta el máximo  $PBASE * (1 + ZPERC)$ . Más aun considerando que la percolación máxima ocurre cuando la zona superior se encuentra totalmente saturada mientras que la inferior está completamente seca y esta puede enunciar en la ecuación (8):

$$\frac{\text{Demanda Máxima de Percolación de la Zona Inferior}}{PBASE} = 1 + ZPERC * \left( \frac{\text{Deficiencia de la zona inferior}}{\text{Capacidad de la zona inferior}} \right) \quad (8)$$

Al ser idénticas la relación de la deficiencia y la capacidad, por ello la demanda de percolación con humedad variable se puede definir en la ecuación (9):

$$\frac{\text{Demanda de Percolación}}{PBASE} = 1 + ZPERC * \left( \frac{\sum(\text{Deficiencia de la zona inferior})^{REXP}}{\sum(\text{Capacidad de la zona inferior})} \right) \quad (9)$$

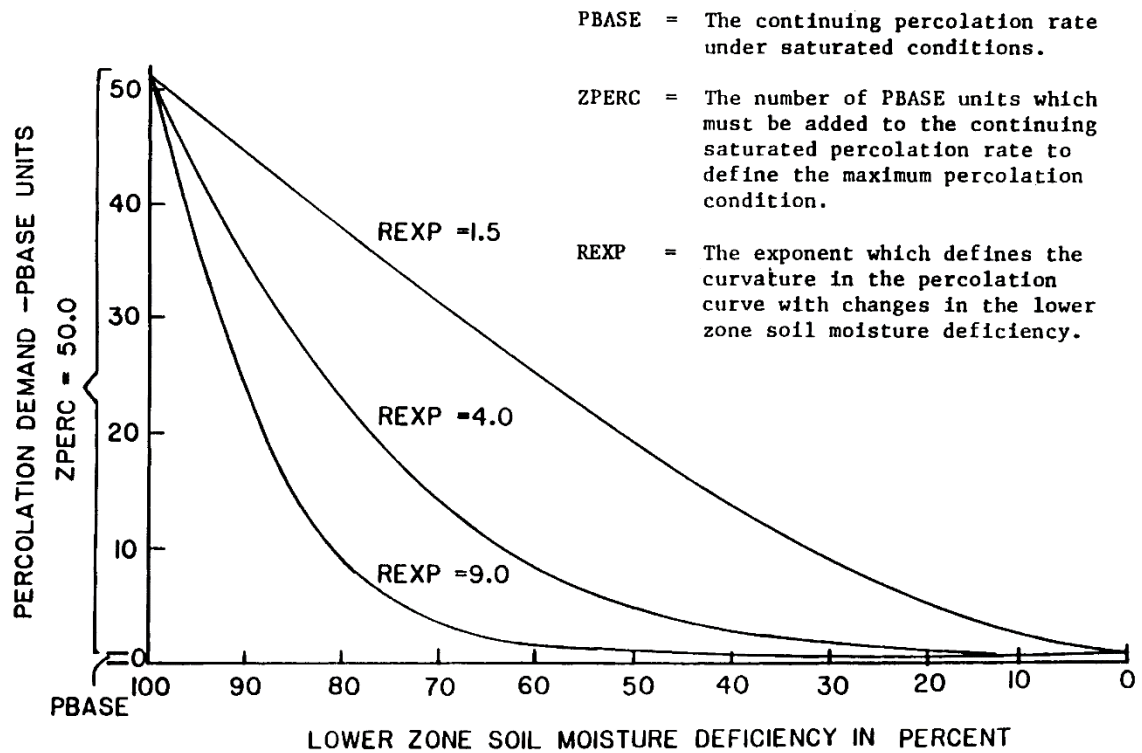
Dado que la percolación real es intervenida por el agua libre de la zona alta, esta se modifica en función de la oferta disponible, por lo que se afecta según la ecuación (10):

$$\text{Percolacion} = \frac{\text{Demanda de Percolación}}{PBASE} * \left( \frac{UZFWC}{UZFWM} \right) \quad (10)$$

La correlación entre la demanda de percolación y el déficit de humedad del suelo en la zona inferior se encuentra en la Grafica 27 para varios valores de  $REXP$  con la suposición de que el agua libre de la zona superior se encuentra constantemente llena. Tales curvas son de manera semejante a los resultados obtenidos en campo.

La capacidad del suelo inferior es la suma del agua en tensión con el agua libre, por ello la percolación está relacionada con el aforo de drenaje del suelo y las condiciones de humedad. Por ello al presentar un humedecimiento discontinuo, el agua de tensión en la zona superior se perdería con la evapotranspiración de modo que requiere primero un llenado de agua libre en la zona superior antes de que la percolación continúe con las características mostradas en la Grafica 27.

Grafica 27 Representación de la demanda de percolación



Fuente: (National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA 2002)

El agua percolada se acumula en tres cámaras, el primero de ellos, la tensión de la zona inferior donde las partículas del suelo absorben agua procedente de la superficie hasta satisfacer la deficiencia, pero según la intensidad de la lluvia esta condición se ve afectada ya que se desvía cierta cantidad de agua como agua libre en la zona inferior antes de que la demanda de tensión sea satisfecha. Por ello se recurre a la variable PFREE, expresada en una fracción. El agua libre en la zona inferior a lo mejor puede ir solo a la tensión de agua o parte de ella puede estar disponible para la acumulación de agua principal o complementario. En cualquier momento el agua aprovechable para surtir estos dos compartimientos se distribuye entre ellos en función de las deficiencias o capacidades entre el uno y el otro. El agua libre en la zona inferior incorpora el flujo horizontal, considerado como flujo base.

### 3.1.4 Flujo base y drenaje subsuperficial

Los beneficios de considerar tres depósitos de agua permiten considerar varios aspectos del descenso del flujo, y por ello se considera el flujo base, para definir cual el este se determina con la ecuación (11):

$$Volumen1 * Facto de drenaje1 + Volumen2 * Facto de drenaje2 \quad (11)$$

Donde

*Volumen1* es el almacenamiento primario

*Volumen2* es el almacenamiento secundario

El acercamiento del flujo base con dos acumulaciones de agua libre en la zona baja permite utilizar una función fija para el descenso de esta permite estimar el flujo base con las siguientes ecuaciones:

$$K_p = \left( \frac{QP_t}{QP_o} \right)^{1/t} \quad (12)$$

$$LZPK = 1 - K_p \quad (13)$$

$$LZFPM = \frac{QP_{max}}{LZPK} \quad (14)$$

Donde:

$K_p$  es el coeficiente de recesión del flujo base primario en una unidad de tiempo diaria

$t$  es el número de unidades de tiempo

$QP_o$  es la descarga cuando el descenso está ocurriendo

$QP_t$  es la descarga para un tiempo  $t$  más tarde

$QP_{max}$  es el flujo base máximo primario y puede inferir en el análisis de los hidrogramas

Con las condiciones en las que se afecta la cuenca, los compartimientos de humedad serían los adecuados para describir la posición del agua en el suelo, a pesar de esto el agua subsuperficial generalmente evade el punto de medición en las cuencas. Por eso para estimar este objeto se supone que los acuíferos que no descargan en el río tienen características similares que el drenaje que, si lo hace, por tanto, las reservas de agua libre de la zona inferior que suministra los flujos

subsuperficiales pueden formularse como una porción de esta mismo aparentes desde los hidrogramas de salida. (el parámetro SIDE constituye esta fracción)

### 3.1.5 Escorrentía

Como resultado del análisis anterior, resulta la escorrentía, la cual se procesa por el algoritmo que representa el manto del suelo superior e inferior. El algoritmo produce escorrentía de las siguientes maneras:

- Escorrentía impermeable de áreas impermeables permanentes y escorrentía directa de áreas impermeables temporales
- Del almacenamiento de agua libre en la zona superior está lleno y la tasa de precipitación supera a la de percolación
- Del drenaje lateral resultante del almacenamiento de agua libre en la zona superior
- Flujo base primario

Por otra parte, el área de la cuenca con características impermeables no tiene que ser un área constante para el modelo, por ello el parámetro ADIMP representa a los pequeños reservorios como pantanos y áreas de salida de infiltración temporal que toman características impermeables linealmente crece la humedad en el suelo.

### 3.1.6 Evapotranspiración

La pérdida de humedad en las distintas capas de suelo derivando de la evapotranspiración depende de los almacenamientos de agua por tensión. A causa de que el suelo se seca por evapotranspiración, la humedad se retira del almacenamiento de agua por tensión de la zona superior a una tasa fija por la evapotranspiración no sobrepasada por la zona superior multiplicada por el fragmento de los contenidos de agua de tensión de la zona inferior respecto a la capacidad total a tensión. En caso de que la evapotranspiración ocurre a una velocidad tal que el almacenamiento de agua libre supere el agua a tensión, entonces se considera que el agua libre suministra equitativamente la tensión del agua y tener en el suelo una humedad que sea lógica. Según las condiciones de la cuenca, se considera que una parte de agua libre de la zona inferior está muy abajo y no está disponible para dicha transferencia. Esta parte se representa con el parámetro RSERV.

### 3.1.7 Parámetros del modelo

En la Tabla 6 se muestran todos los parámetros que se manejan de este modelo, en la columna 1 se observa los parámetros definidos anteriormente, en la columna 2 se observa el valor por defecto que se considera, y las columnas 3 y 4 son los valores mínimos y máximos respectivamente, en los cuales los parámetros pueden variar. Los valores de esta tabla son todos los parámetros vistos anteriormente:

Tabla 6 Parámetros del modelo Sacramento

Parameter	Default value	Default minimum	Default maximum
Adimp	0.01	0.00	1.00
Lzfpm	40	0	50
Lzfsm	23	0	50
Lzpk	0.009	0	1
Lzsk	0.043	0	1
Lztwm	130	0	400
Pctim	0.01	0.00	1.00
Pfree	0.063	0.000	1.000
Rexp	1	0	3
Rserv	0.3	0.0	1.0
Sarva	0.01	0.00	1.00
Side	0	0	1
Ssout	0.001	0.000	1.000
Uzfwm	40	0	80
Uzk	0.245	0.000	1.000
Uztwm	50	0	100
Zperc	40	0	80

Fuente: (Podger 2004)

### 3.2 Australian Water Balance Model (AWBM)

Según (Atlassian Confluence [sin fecha]) describe al modelo creado por Walter Boughton en conjunto con Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Este modelo realiza modelación en balance hídrico, en la cual se vincula con la precipitación diaria y la evapotranspiración con la escorrentía superficial, también modela hidrogramas de inundación. Tomando el capítulo 1.4 se tiene que el modelo es:

- Formal
- Conceptual
- No lineal
- Tiempo invariable
- Agregado
- Procesos continuos

En la Tabla 7 se detallan las distintas variables de ingreso y salida para este modelo, es de aclarar que en la salida de calibración y validación el coeficiente de eficiencia NSE tal lo describe el título 1.8.2.6, este valor compara los resultados dados por el modelo con los datos tomados en campo, además de que según el título 1.8.2.3, el programa muestra distintas graficas de comparación de datos entre los calculados por el modelo y los observados.

Tabla 7 Variables de entrada y salida del modelo AWBM

Variables de entrada	
Calibración y validación	Simulación
Precipitación ( <i>mm</i> )	Precipitación ( <i>mm</i> )
Evapotranspiración ( <i>mm</i> )	Evapotranspiración ( <i>mm</i> )
Área de la cuenca ( <i>km</i> <sup>2</sup> )	Área de la cuenca ( <i>km</i> <sup>2</sup> )
Caudal ( <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>s</i> )	-
Variables de salida	
Coefficiente de eficiencia (NSE)	Caudal ( <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>s</i> )

Fuente: (Boughton et al. 2003)

El modelo se compone de cinco almacenamientos, en los cuales tres corresponden a la superficie, una como flujo base y una para la escorrentía superficial. Este modelo es aplicado ampliamente en Australia por distintos hidrólogos, pero se tienen pocos registros de que el modelo se haya aplicado en otras partes del mundo.

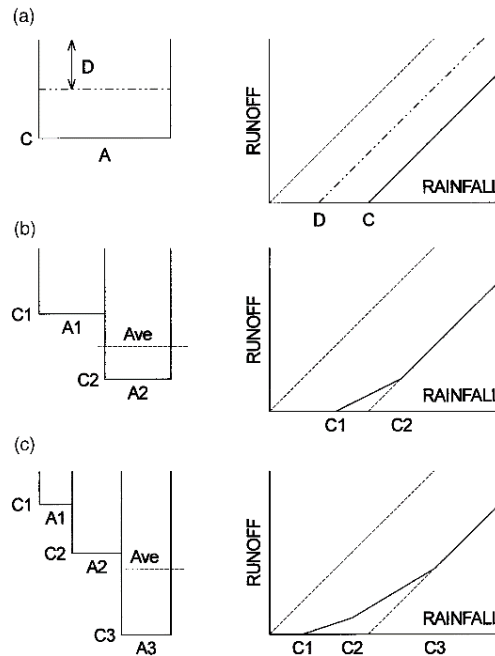
La lógica en este modelo se encuentra en el artículo The Australian water balance model escrito por Walter Boughton (Boughton 2004). Este modelo tiene la capacidad de ejecutarse en tiempos diarios que es utilizada para estudios de rendimiento y gestión del agua, también en intervalos horarios, del cual es usado para la estimación de inundaciones. El modelo tiene la peculiaridad de procesos de calibración basados en la estructura del modelo, donde es posible calibrarlo con el análisis gráfico de los datos de precipitación y escorrentía, regresión lineal y un sistema de calibración automático.

### 3.2.1 Generación de escorrentía

La humedad de la superficie de la cuenca difiere según el tiempo transcurrido luego de la última lluvia, considerando un tanque de almacenamiento como la superficie de la cuenca representada en la Ilustración 48.a donde se parte con la suposición de que toda la lluvia se recolecta en este tanque y hasta que no reboce, no se produce escorrentía. Dependiendo de la altura que tenga el almacenamiento será la humedad que tenga el suelo, si el suelo se encuentra seco por falta de lluvia, el nivel del almacenamiento es mínimo, por ende, para producir escorrentía es necesario llenarse antes, tomando el comportamiento de la línea C en la gráfica Lluvia – escorrentía con una pendiente de 1, esto quiere decir que toda la lluvia se convierte en escorrentía. Sosteniendo que en un tiempo cercano se produjo lluvia, el suelo tendrá una humedad parcial y para producir escorrentía deberá llenar el Déficit D y la relación la lluvia – escorrentía tenderá a la línea D. Si se considera que el suelo está totalmente saturado, la correlación lluvia – escorrentía tiene un intersección en el centro de la gráfica.



### Ilustración 48 Relación del escurrimiento con la lluvia con variabilidad en el almacenamiento superficial



Fuente: (Boughton 2004)

Al fraccionar la cuenca en dos cavidades como en la Ilustración 48.b, donde las capacidades  $C_1$  y  $C_2$  representan las áreas  $A_1$  y  $A_2$  respectivamente. Estas áreas son complementarias entre sí, por lo tanto  $A_1 + A_2 = 1.0$ , la escorrentía inicia al llenarse  $A_1$  y traspasa a  $A_2$ . Además si se llena totalmente el compartimiento  $A_2$  se tiene un comportamiento lluvia - escorrentía con relación de 1. Al tender la línea de  $45^\circ$  hacia el eje x se obtiene que la capacidad de almacenamiento promedio es igual a  $Ave = C_1 * A_1 + C_2 * A_2$ .

Al asignar otro almacenamiento, así como en la Ilustración 48.c se obtiene una curva lluvia – escorrentía más suave, esta es similar a la obtenida en distinta bibliografía.

#### 3.2.2 Descarga y recarga del flujo base

Anteriormente no se tenía en cuenta el flujo base, pero este factor es importante en muchas cuencas, dado lo anterior, se toma un compartimiento único para el flujo base. La retirada de agua del flujo base tiende a ser lineal en situación del logaritmo del tiempo, se representa por la fracción  $k_b$  y se denomina “constante de recesión” así mismo,  $(1 - k_b)$  es la cantidad de agua del flujo base que se descarga por unidad de tiempo. El modelo se estructura para que al producir escorrentía, cierta parte de la escorrentía se vaya a la reserva del flujo base.

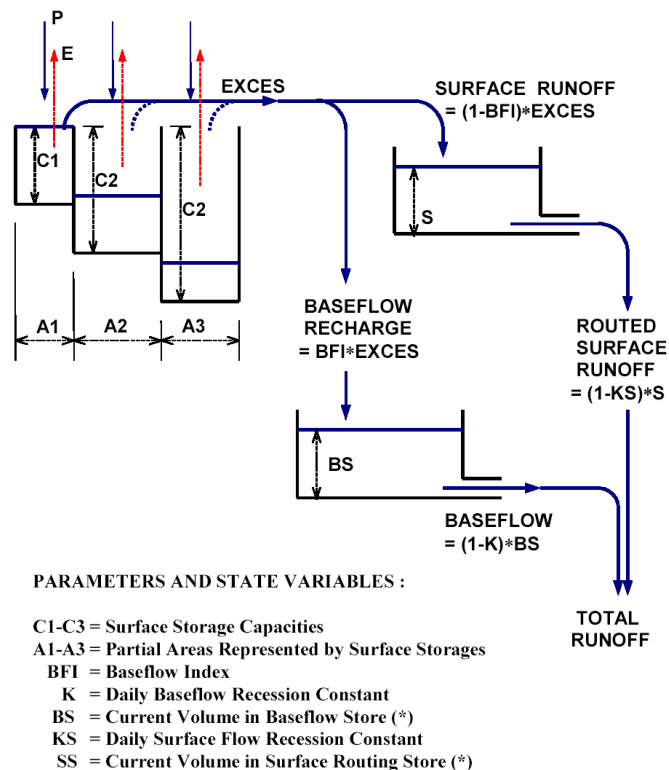
### 3.2.3 Estructura del modelo

La estructura del modelo se muestra en la Ilustración 49 aplicando la lógica anteriormente vista. La precipitación se deposita en los compartimientos  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  donde la evapotranspiración puede salir de cada una de estas. Se añade un quinto almacén que describe la escorrentía superficial.

Se escogieron tres almacenamientos en la superficie y no otra cantidad distinta debido a que entre más parámetros tenga el modelo se podría obtener un mejor ajuste, pero en consecuencia sería menos flexible para otras cuencas y hallar los valores adecuados para cada compartimiento es más difícil además de desconfiar de valores ya escogidos, y menos se tendría un menor ajuste a los datos de precipitación.

La formulación del modelo fue descrito en eWater, (Atlassian Confluence [sin fecha]) en esta página se origina el programa descrito en la sección 1.8.2.3. En él dice que si la humedad del suelo se vuelve negativo, esta toma un valor de cero, debido a que la solicitud de evapotranspiración es mayor a la humedad del suelo. Si la humedad es superior a la que puede almacenar el suelo, este se convertirá en escorrentía superficial, restituyendo la capacidad de humedad.

Ilustración 49 Estructura del modelo AWBM



Fuente: (Podger 2004)

El área de captación se representa en tres subáreas, A1, A2 y A3, y cada una representa una sección de suelo, esto puede ser definido por el usuario o tomado de la clasificación del suelo. Se tiene que cumplir la ecuación (15):

$$A1 + A2 + A3 = 1 \quad (15)$$

Donde el usuario puede estimar A1 o A2, pero para el valor de A3, se calcula despejando este valor de la ecuación (16), para que cumpla la condición. El modelo puede estimar estos valores automáticamente, para ello utiliza los siguientes parámetros:

$$A1_{new} = \max(0, \min(A1, 1)) \quad (16)$$

$$A2_{new} = \begin{cases} A2 & \text{if } (A1_{new} + A2 \leq 1) \\ 1 - A1_{new} & \end{cases} \quad (17)$$

$$A3 = 1 - A1_{new} - A2_{new} \quad (18)$$

Cuando se produce escorrentía desde cualquier almacenamiento superior, una fracción de esta recarga el almacenamiento de flujo base, la porción de escorrentía que se utiliza para recargar esto se estima con BFI, el cual relaciona el flujo base con el flujo total, se define en la ecuación (19):

$$1 - BFI \quad (19)$$

El resto de se convierte en escorrentía superficial. El flujo base fluye a una velocidad estimada con la ecuación (20):

$$(1 - K) * BS \quad (20)$$

Donde:

*BS* es el almacenamiento de flujo base.

*K* es la constante de decrecimiento del flujo base en función del tiempo.

En la escorrentía superficial se puede simular el retraso que tiene esta hasta llegar al punto de cierre de la cuenca, este funciona de la misma manera que en el flujo base, con la ecuación (21):

$$(1 - KS) * SS \quad (21)$$

Donde:

$SS$  es el almacén de la esorrentía

$KS$  es la constante de decrecimiento de la esorrentía en función del tiempo

### 3.2.4 Parámetros del modelo

En la Tabla 8, en la columna 1 se observan los parámetros a calibrar en el modelo, en la columna 2 los valores por defecto que tiene el modelo, y en las columnas 3 y 4 los valores mínimos y máximos que pueden tomar los parámetros:

Tabla 8 Parámetros del modelo AWBM

Parameter	Default value	Default minimum	Default maximum
A1	0.134	0.000	1.000
A2	0.433	0.000	1.000
BFI	0.350	0.000	1.000
C1	7	0	50
C2	70	0	200
C3	150	0	500
KBase	0.950	0.000	1.000
KSurf	0.350	0.000	1.000

Fuente: (Podger 2004)

## 4. Implementación de los modelos

### 4.1 Periodos de calibración y validación

Los periodos fueron escogidos según lo dicho por Podger (Podger 2004), se tiene en cuenta que al manejar todos los periodos como calibración:

“Esta es la calibración más óptima de los datos disponibles que se puede lograr. El problema con esto es que no tiene indicación de cómo es probable que el modelo funcione fuera del periodo de calibración” (Podger 2004)

Es decir, que no se puede establecer que tan robusto es el modelo en periodos fuera de la calibración, por ello el autor dice que:

“De un sustancial periodo de registro de flujo largo es el método preferido para calibrar los modelo de esorrentía de lluvia” (Podger 2004)

En este caso se tienen más de 30 años de registro en cada Cuenca, por consiguiente es adecuado tomar esta referencia, pero discute sobre los periodos más óptimos que se deben tener para calibración y validación, así que recomienda:

“Si es posible, los periodos de validación y calibración deben tener una duración similar. Sin embargo, para incluir suficiente variabilidad climática en el periodo de calibración, solo se cubre un tercio del periodo de registro” (Podger 2004)

Así que tomando lo anterior se tomaron 2/3 de los datos disponibles para calibrar el modelo y 1/3 del mismo para validar. Por efectos del programa, los años clasificados según la Clasificación de periodos según el índice ONI se debe poner continuos, por ello todas las fechas van a empezar desde el 01/01/1983 en adelante. Claro lo anterior se da la Tabla 9 donde se resumen los periodos tomados en la cuenca del rio Coello:

Tabla 9 Periodos de calibración y validación en cuenca del rio Coello

Periodo	Calibración	Validación
Sin alterar	1/01/1983 - 30/05/2002	31/05/2002 - 31/12/2011
Niño	1/01/1983 - 30/12/1986	31/12/1986 - 29/12/1988
Niño - Niña	1/01/1983 - 30/09/1985	1/10/1985 - 30/12/1986
Niña	1/01/1983 - 30/12/1987	31/12/1987 - 29/12/1989
Niña - Niño	1/01/1983 - 30/12/1984	-
Normal	1/01/1983 - 31/12/1989	1/01/1990 - 31/12/1992

Fuente: Propia

Para la cuenca del río Ceibas, lo dicho por Podger se demostró que no es muy conveniente tomar estos rangos. Principalmente a cierta incongruencia entre los datos vistos en el hidrograma de la Gráfica 26, así que para obtener mejores resultados, se calibran los modelos antes del año 2000 y se validan después del 2005, dando como resultado la Tabla 10, de modo que los periodos no son los mismos que en la cuenca del río Coello al contar con registros similares:

Tabla 10 Periodos de calibración y validación cuenca del río las Ceibas

Periodo	Calibración	Validación
Sin alterar	19/10/1983 - 25/12/1997	1/01/2005 - 23/02/2015
Niño	1/01/1983 - 31/12/1986	20/03/1989 - 29/12/1989
Niño - Niña	19/10/1983 - 31/12/1985	1/01/1986 - 30/12/1986
Niña	1/01/1983 - 30/04/1986	1/01/1987 - 15/07/1989
Niña - Niño	1/01/1983 - 30/12/1984	-
Normal	1/01/1983 - 31/12/1989	1/01/1992 - 28/12/1995

Fuente: Propia

## 4.2 Calibración y validación de los modelos

Los archivos suministrados por el IDEAM, el resultado luego del procesamiento de relleno de información clasificada por fenómeno climático en carpetas y los archivos para poder abrirlos en el programa rrl rainfall runoff library (incluido en el Anexo 1) se encuentran en el Anexo 2. Mientras en el Anexo 3 es un libro elaborado en Microsoft Office Excel y se puede navegar con ayuda de hipervínculos donde se muestran todos los gráficos dados por el programa rrl rainfall runoff library en la calibración y validación de modelos en los distintos fenómenos climáticos evaluados.

### 4.2.1 Cuenca del río Coello

Tabla 11 Resumen de resultados de calibración y validación en la cuenca del río Coello

Periodos	Sacramento		AWBM	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Sin alterar	0.029	-0.604	0.227	-0.029
Niño	0.366	0.333	0.350	0.314
Niño – Niña	0.480	0.682	0.487	0.662
Niña	0.372	0.429	0.373	0.324
Niña – Niño	0.568	-	0.416	-
Normal	0.405	-0.015	0.344	-0.049

Fuente: Propia

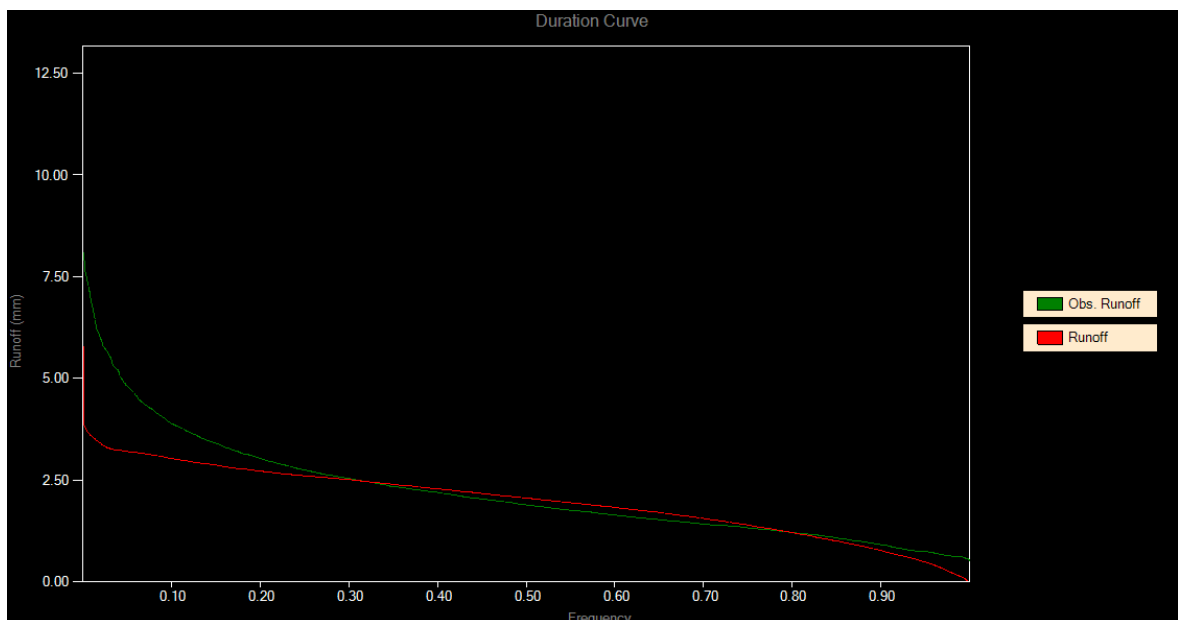
En la Tabla 11 se encuentra el resumen de datos obtenidos en la calibración y validación de ambos modelos en la cuenca evaluados con el parámetro NSE.

#### 4.2.1.1 Sin alteración de los datos

El ajuste no es el adecuado para proceder a simulaciones, sin embargo es notable la diferencia del ajuste obtenido con Sacramento y AWBM (Tabla 11), esto se afirma aún más al obtener un NSE en la validación menor a 0. Sin embargo contrario a esto, en la curva de duración de Sacramento tiene un acercamiento muy bueno a lo largo de la curva antes de llegar al 30% los caudales más altos (Grafica 28), mientras el modelo AWBM es muy disperso en este aspecto (Grafica 29) al tener en un 40% de los caudales más altos sub estimados y el restante con una sobre estimación muy alta.

Una causa probable del mal ajuste es el cambio del uso del suelo a lo largo del tiempo de calibración, la ciudad de Ibagué ha crecido desde el año de 1983 hasta la actualidad. Esto puede verse en la dispersión de los datos observados (Grafica 30) que llega a ser de 8 mm, pero la calculada con el modelo no llega a pasar los 4 mm, lo cual es la mitad de los máximos observados, es decir, estos tienen una forma rectangular, donde los datos menores son sobre estimados por Sacramento en el caso de la esquina izquierda superior, y los datos más altos son subestimados, caso de la parte derecha inferior, en consecuencia el comportamiento de estas esquinas son alejados al comportamiento lineal con pendiente constante que deben tener estos datos para lograr un mejor NSE.

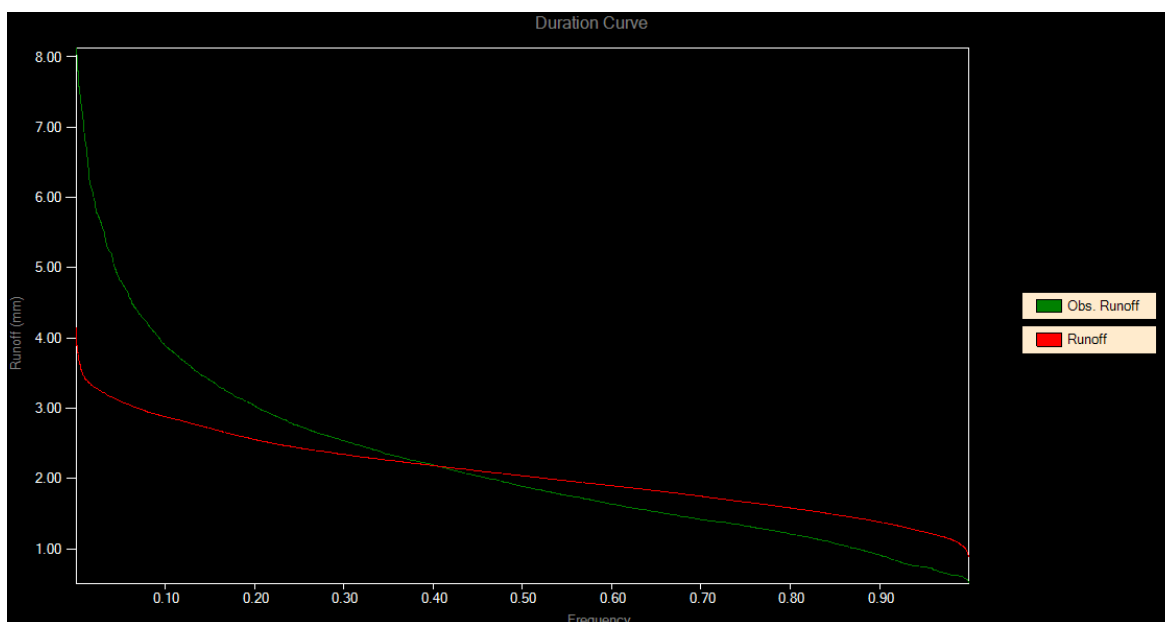
Grafica 28 Curva de duración cuenca del río Coello en la calibración del modelo Sacramento para datos sin alterar



Fuente: (Boughton et al. 2003)

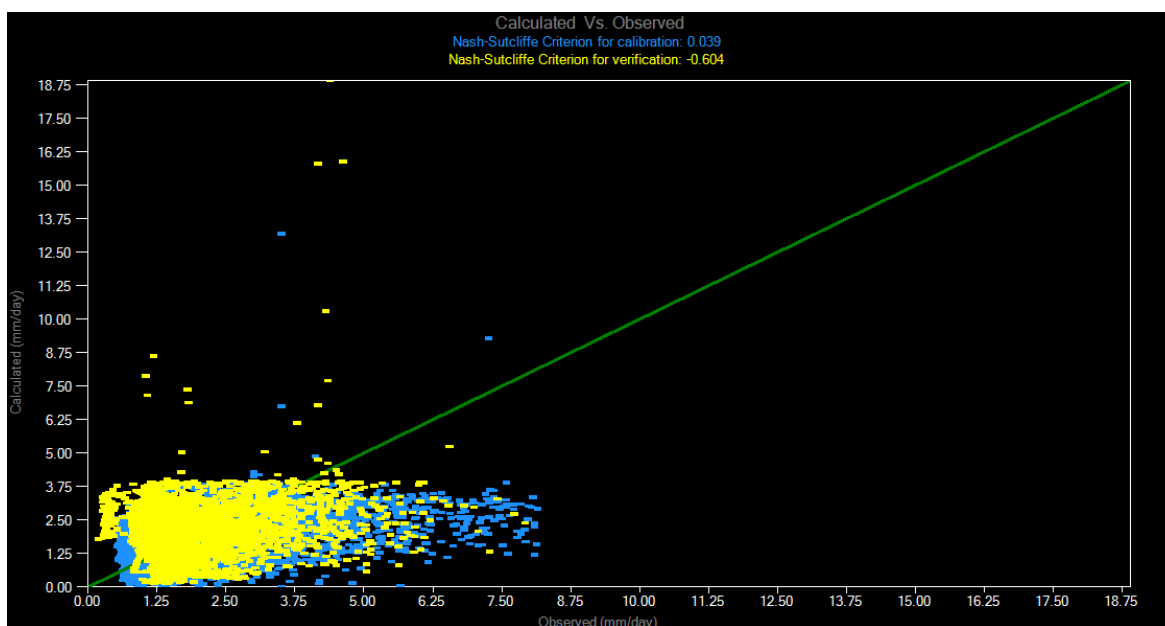


Grafica 29 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo AWBM para datos sin alterar



Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 30 Calculado Vs observado en la cuenca del rio Coello del modelo Sacramento sin alterar los datos



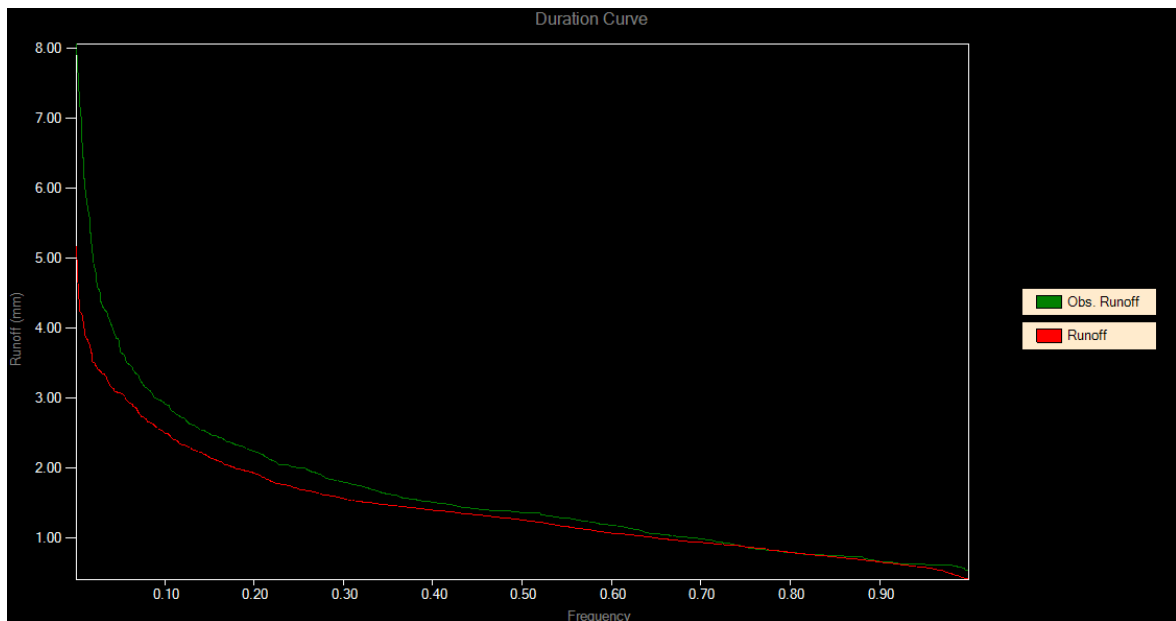
Fuente: (Boughton et al. 2003)

#### 4.2.1.2 Fenómeno del Niño

Se tiene un NSE satisfactorio en ambos periodos, adicional a lo dicho en el título 4.2.1.1 la adaptación del caudal calculado y registrado es buena en ambos modelos y bastante similar, sin embargo, en la calibración de ambos modelos la curva de duración es bastante cercana, tiende a sub estimar las escorrentías más altas (Grafica 38 y Grafica 39), otro rasgo es que en el modelo Sacramento es capaz de identificar los caudales más bajos, incluso sub estima aproximadamente el 5% más bajo, caso contrario a AWBM donde sobre estima cerca del 50% de la escorrentía menor. Como resultado da que el modelo Sacramento identifica mejor los caudales más bajos, y a la hora de estimar la oferta hídrica de la cuenca se puede concluir con el modelo Sacramento cuales serían los caudales más bajos que posiblemente se puedan producir. Así mismo en la validación de Sacramento (Grafica 33) en la que cerca del 25% de la escorrentía más baja es sub estimada por el modelo. Un defecto posible es la sobre estimación de los caudales más altos, en consecuencia a la hora de estimar el periodo de sequía, no podría ser correctamente estimado este periodo ni los caudales altos. Mientras que con AWBM este es sobre estimado en todos los periodos.

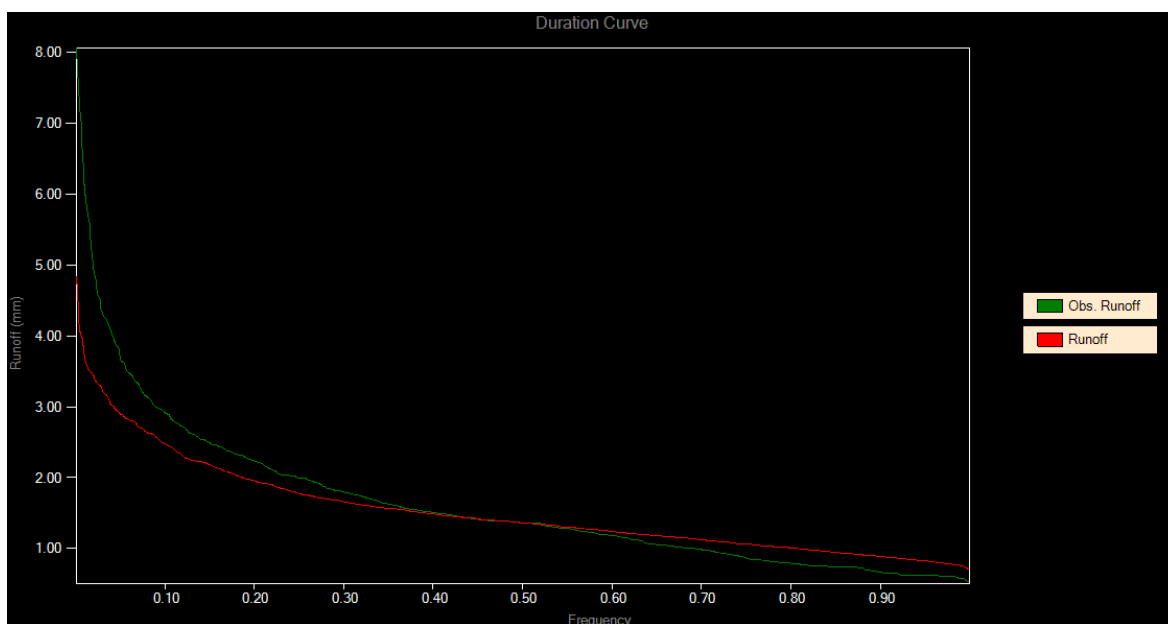
Es por esto que para identificar mejor como afecta el fenómeno del niño a la oferta hídrica de la cuenca, es recomendable utilizar el modelo Sacramento para tener en cuenta los caudales más bajos.

Grafica 31 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo Sacramento en fenómeno del Niño



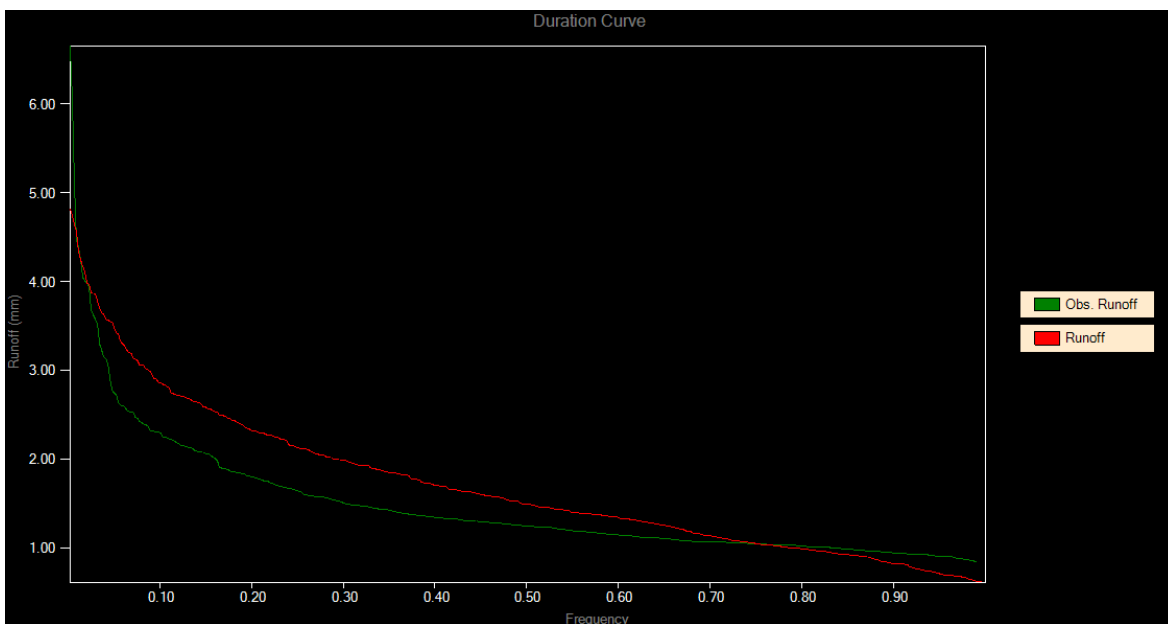
Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 32 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo AWBM en fenómeno del Niño



Fuente: (Boughton et al. 2003)

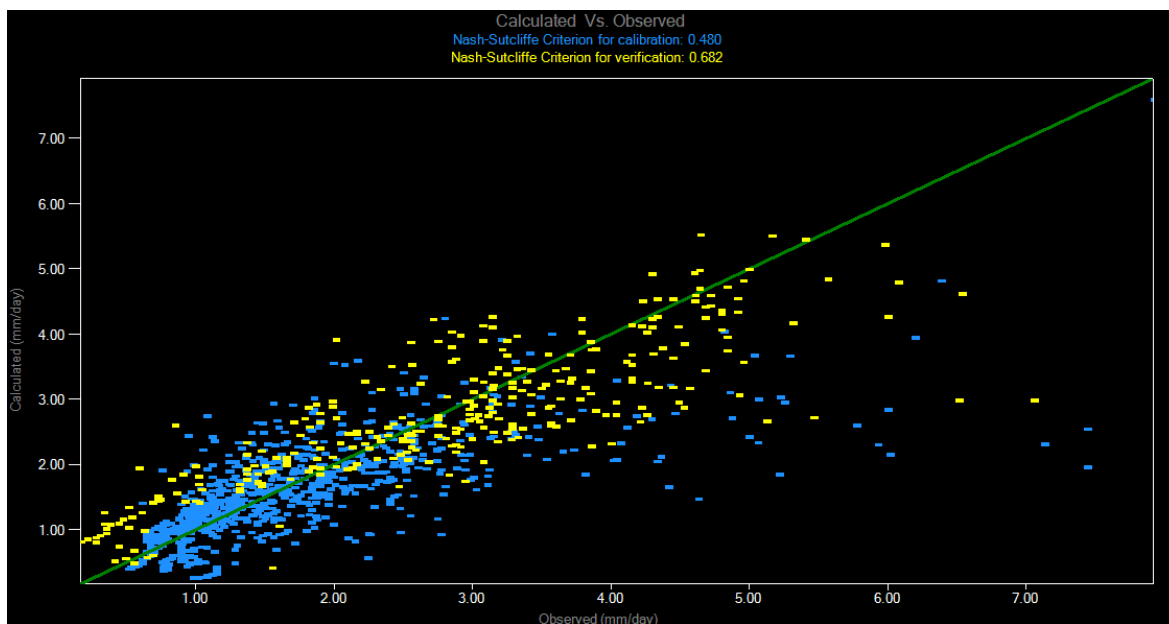
Grafica 33 Curva de duración cuenca del rio Coello en la Validación del modelo Sacramento en fenómeno del Niño



Fuente: (Boughton et al. 2003)

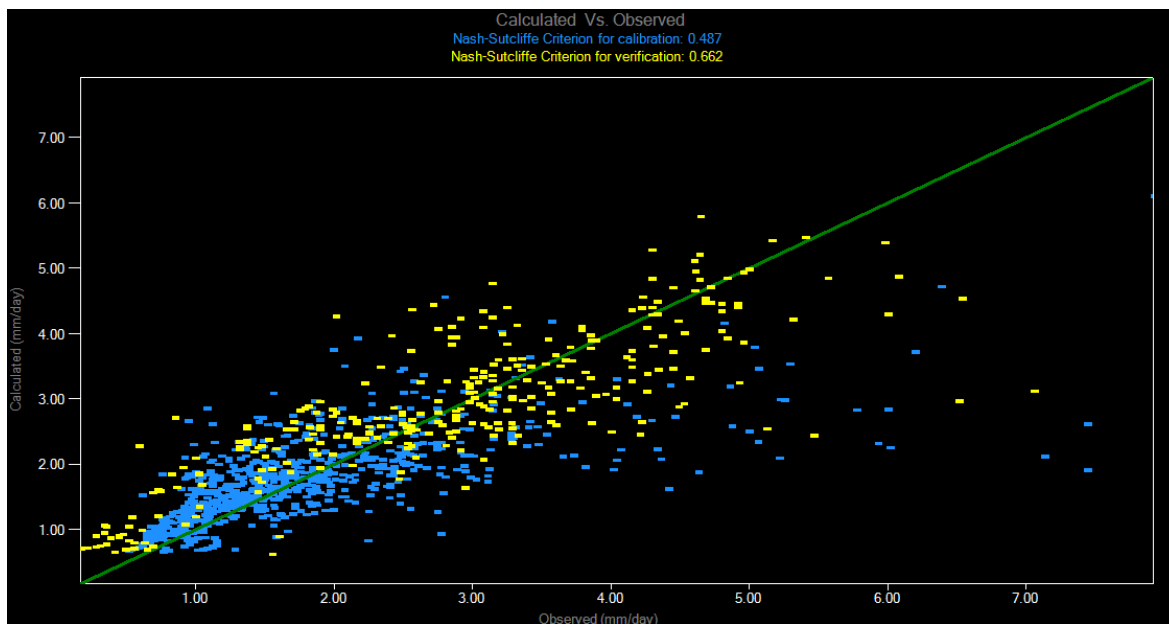
#### 4.2.1.3 Transición de fenómenos Niño – Niña

Grafica 34 Calculado Vs Observado cuenca del rio Coello modelo Sacramento para transición de fenómenos Niño - Niña



Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 35 Calculado Vs Observado cuenca del rio Coello modelo AWBM para transición de fenómenos Niño - Niña



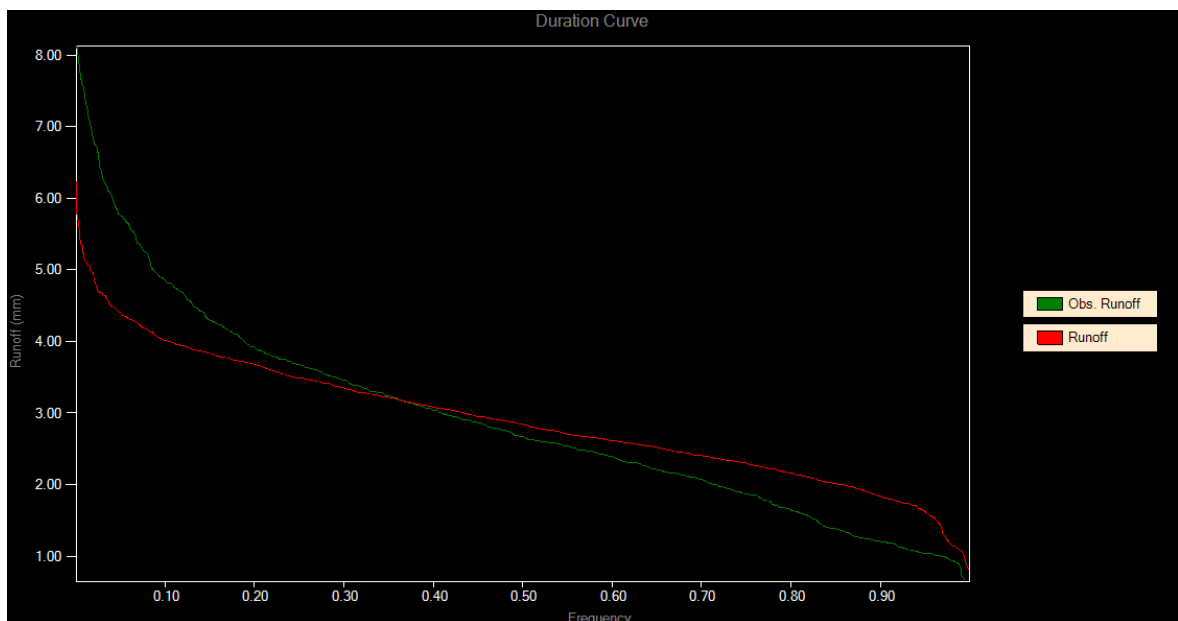
Fuente: (Boughton et al. 2003)

Los modelos para esta situación se adaptaron bastante bien, alcanzando una distribución de Calculado Vs Observado con tendencia lineal en ambos modelos (Grafica 34 y Grafica 35) en la calibración y validación de estos, mejorando drásticamente la validación del modelo, igualmente la capacidad de adaptación al flujo real es muy buena, pero en las curvas de duración de la calibración de los modelos procuran sobre estimar el volumen real un poco, caso contrario pasa en las mismas gráficas en la validación, donde gran parte del flujo calculado es subestimado, pero aproximadamente el 35% de los caudales más bajos son sobre estimados.

#### 4.2.1.4 Fenómeno de la Niña

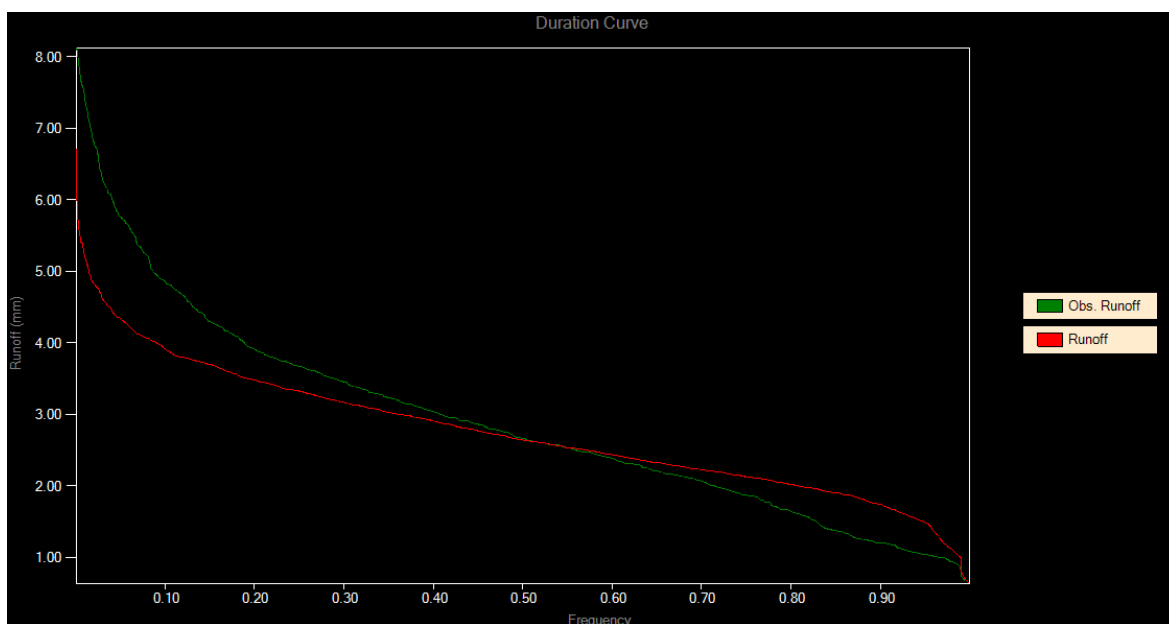
La calibración de los modelos en este fenómeno fue un ajuste satisfactorio con una validación que llega a ser buena, a pesar de no poseer un NSE más alto, la escorrentía calculada tiene un comportamiento concuerdo a la observada. Pero en la curva de duración se este es ambiguo (Grafica 36 y Grafica 37), ya que cerca del 50% de la escorrentía más alta es sub estimada, mientras que el otro 50% es sobre estimada. Esto quiere decir que estos modelos no son apropiados para identificar los caudales más altos, pero podría ser de utilidad para identificar el caudal medio obtenido en ciertos puntos de la cuenca durante el fenómeno climático de la Niña. En efecto no se recomienda valerse de estos modelos para diseñar obras hidráulicas al tener en ambos modelos una sub estimación importante.

Grafica 36 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo Sacramento en fenómeno de la Niña



Fuente: (Boughton et al. 2003)

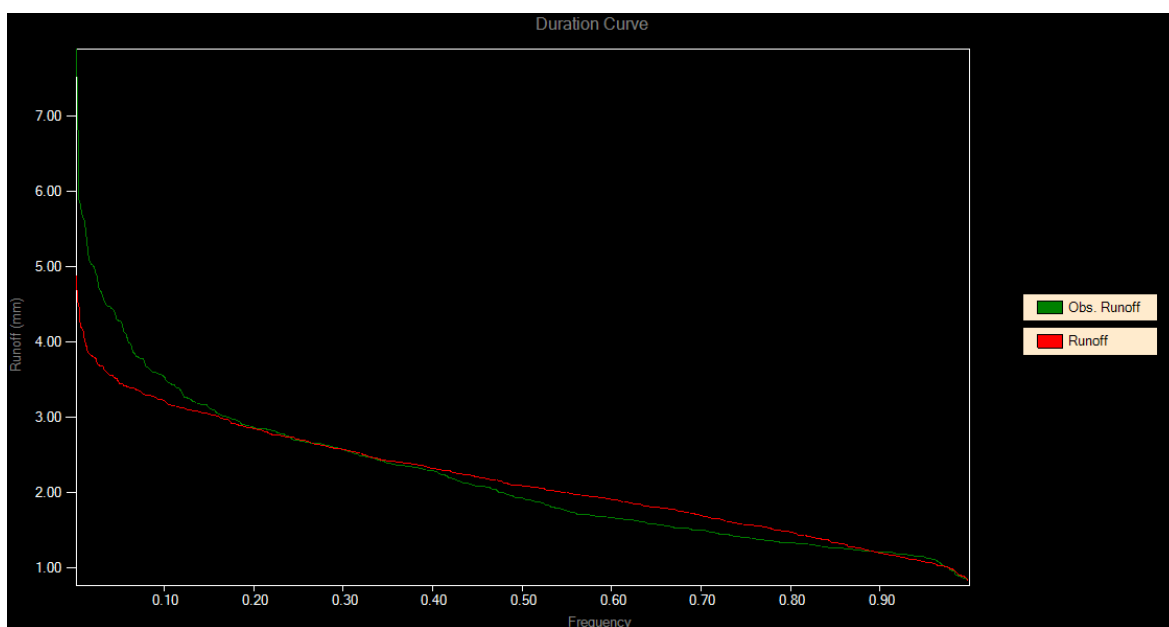
Grafica 37 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo AWBM en fenómeno de la Niña



Fuente: (Boughton et al. 2003)

#### 4.2.1.5 Transición de los fenómenos Niña – Niño

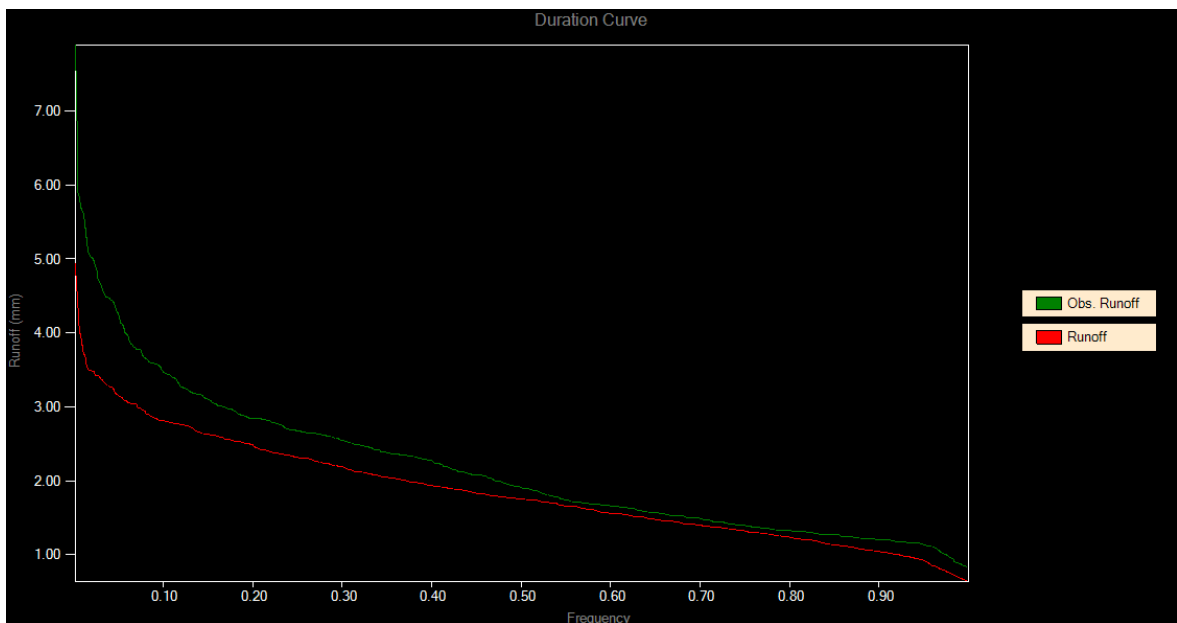
Grafica 38 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo Sacramento en transición de Niña – Niños



Fuente: (Boughton et al. 2003)

Este es el único caso donde no se aplica validación al tener solamente 2 años en esta situación. El valor de NSE es la más alta obtenida en contraste con los otros fenómenos, ambos modelos evaluados con un NSE bueno, donde el modelo Sacramento es más alto en comparación con AWBM. Este aspecto se justifica mejor con las curvas de duración (Grafica 38 y Grafica 39), para el modelo Sacramento la adaptación a la curva es mejor con un poco de sobre estimación a lo largo de los registros en excepción del 15% de la escorrentía más alta, mientras que con AWBM se obtiene una sub estimación en todos los registros.

Grafica 39 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo AWBM en transición de Niña – Niños



Fuente: (Boughton et al. 2003)

#### 4.2.1.6 Ocurrencia normal del clima

A pesar de estar evaluada la calibración con un NSE satisfactorio en ambos modelos, no se delata de la misma manera en la validación, con valores negativos cercanos a 0. A lo mejor esto se puede tratar de que los periodos que se tomaron para validación son muy lejanos a los usados en la calibración, es decir, en la línea de tiempo en este fenómeno, la calibración se llevó a cabo en años superiores a 1996, mientras que la validación en algunos años mayores al 2001, 5 años después de la calibración, el uso del suelo y/o la cobertura vegetal cambiaron drásticamente en este lapso del tiempo. Otra justificación de este comportamiento en la validación es que los modelos sub estimaron algunos caudales esperados, detallando un poco la Grafica 40, se observan dos orígenes de datos de validación, cuando la distribución debe ser homogénea como en la calibración, en cambio de esto hay

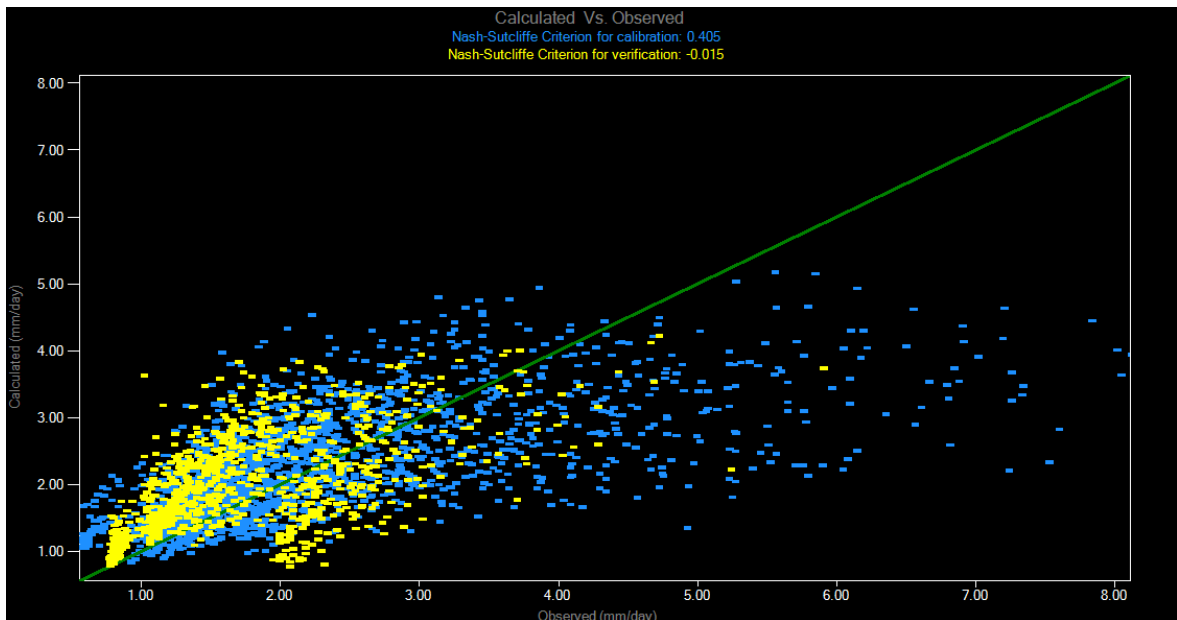


datos de escorrentía observados originados desde 1, y el calculado es aproximadamente el mismo, en cambio desde el origen de datos cercanos a 2, el modelo sub estima esta escorrentía, creando así dos concentraciones distintas afectando directamente el NSE obtenido, Igualmente con AWBM.

Mientras que en las curvas de duración de calibración (Grafica 41 y Grafica 42) la escorrentía en Sacramento es poco sobre estimada a lo largo de los registros, en AWBM esta es casi igual en todo el registro, pero la causa del mejor ajuste en Sacramento es que la intersección de la curva de duración de los datos calculados con los obtenidos es más lejana del centro en Sacramento que en AWBM, es decir, en Sacramento dicha intersección se divide en el 20% de los datos más altos, mientras que en AWBM en el 35% más alto, y en los caudales mayores más altos son sub estimados, afectando más el NSE en AWBM.

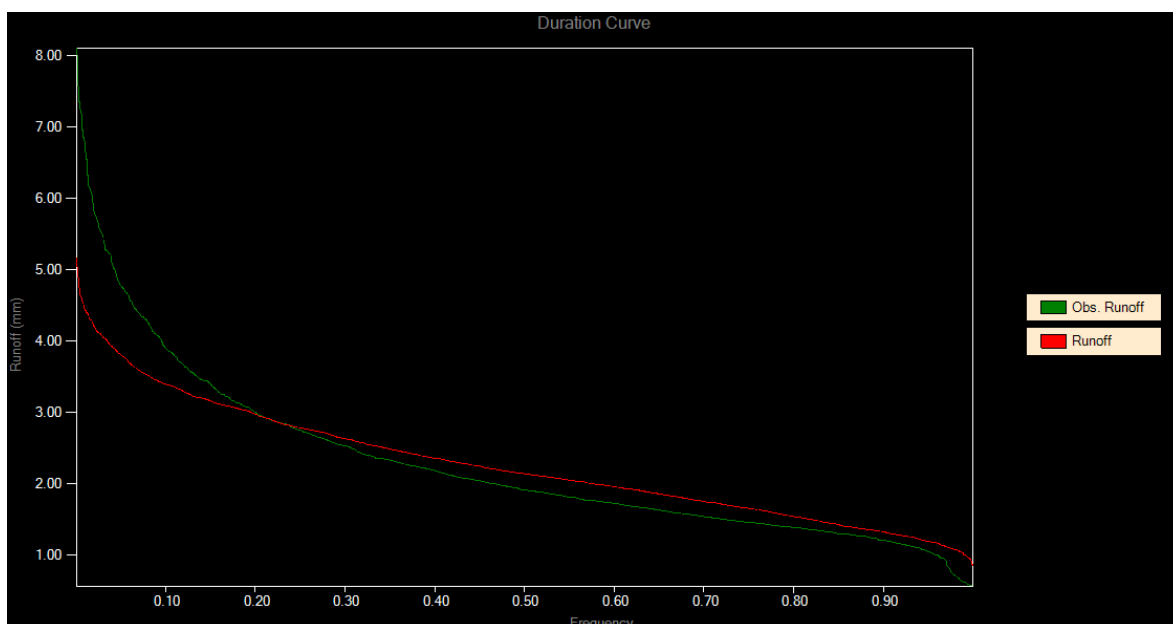
En definitiva, el modelo que mejor identifica las condiciones normales de escorrentía superficial es el modelo Sacramento, sin embargo, los caudales más altos no se pueden estimar de manera correcta.

Grafica 40 Calibración Vs Validación en cuenca del rio Coello para el modelo Sacramento en ocurrencia normal del clima



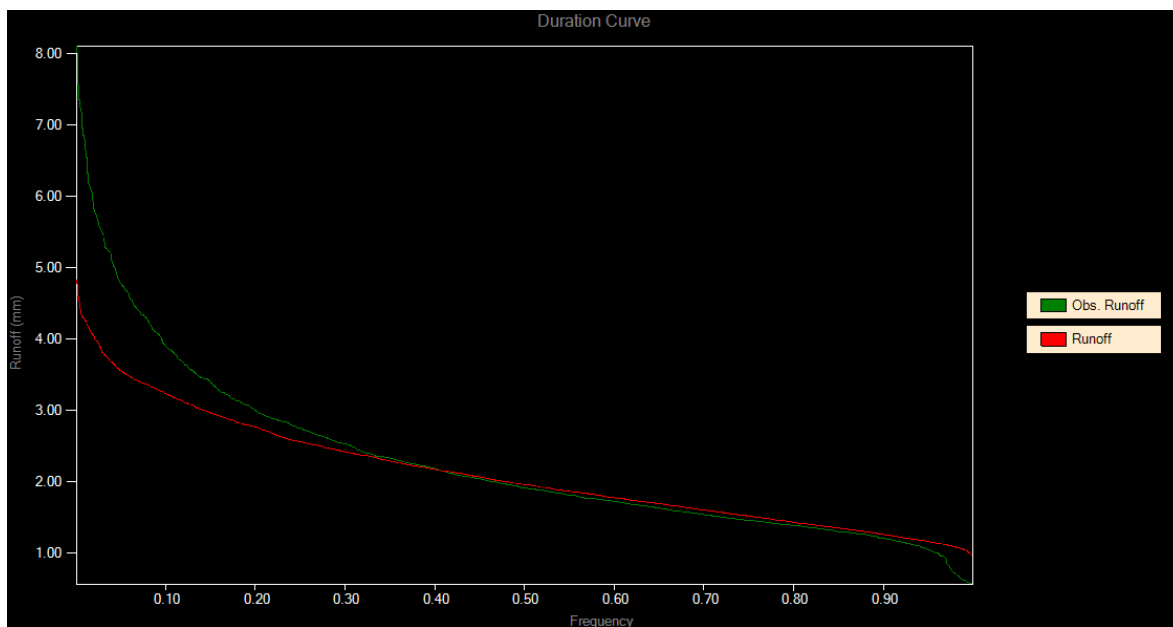
Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 41 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo Sacramento en ocurrencia normal del clima



Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 42 Curva de duración cuenca del rio Coello en la calibración del modelo AWBM en ocurrencia normal del clima



Fuente:(Boughton et al. 2003)

#### 4.2.2 Cuenca del rio las Ceibas

En la Tabla 12 se encuentra el resumen de datos obtenidos en la calibración y validación de ambos modelos en la cuenca evaluados con el parámetro NSE.

Tabla 12 Resumen de resultados de calibración y validación en la cuenca del rio las Ceibas

Periodo	Sacramento		AWBM	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Sin alterar	-0.098	-8.158	0.438	-2.029
Niño	0.315	-0.234	0.325	-0.771
Niño – Niña	0.156	-71.11	0.129	-2.754
Niña	-0.45	-9.835	-0.417	-0.195
Niña – Niño	-3.331	-	-1.526	-
Normal	0.184	-0.026	0.373	0.410

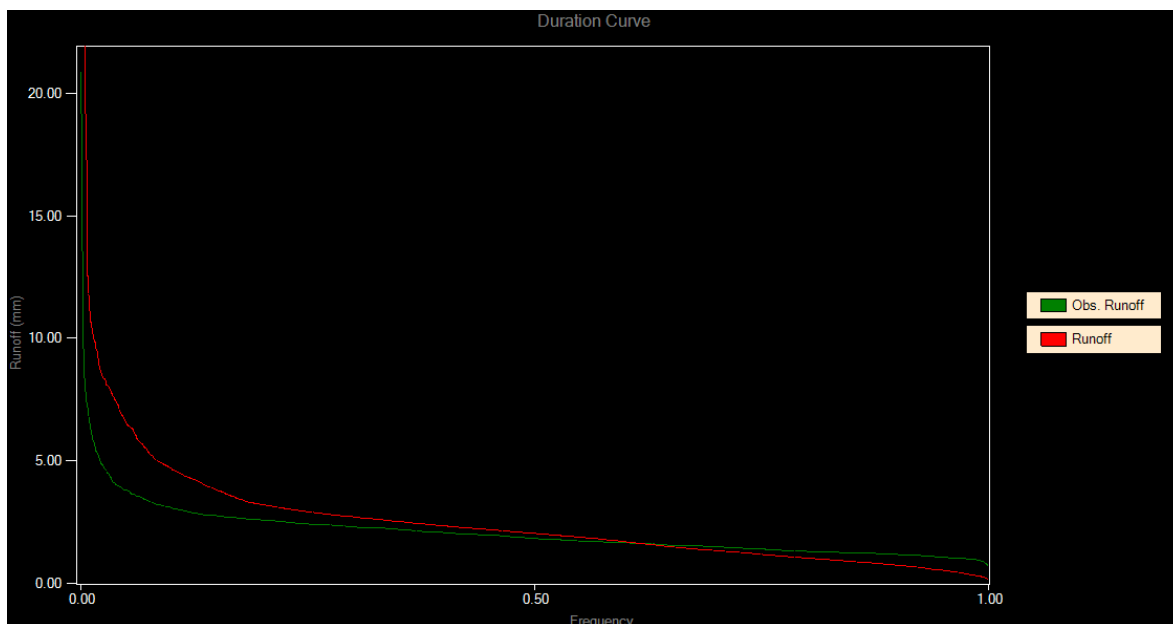
Fuente: Propia

##### 4.2.2.1 Sin alteración de los datos

El modelo Sacramento no se adapta en la cuenca, la calibración tiene un NSE por debajo de 0 pero cercano a este, semejante a la verificación el modelo, la cual calcula escorrentía muy alta y no se ven reflejados en lo observado. Al plasmar un acercamiento en la validación (Grafica 43), se justifica el desajuste del modelo.

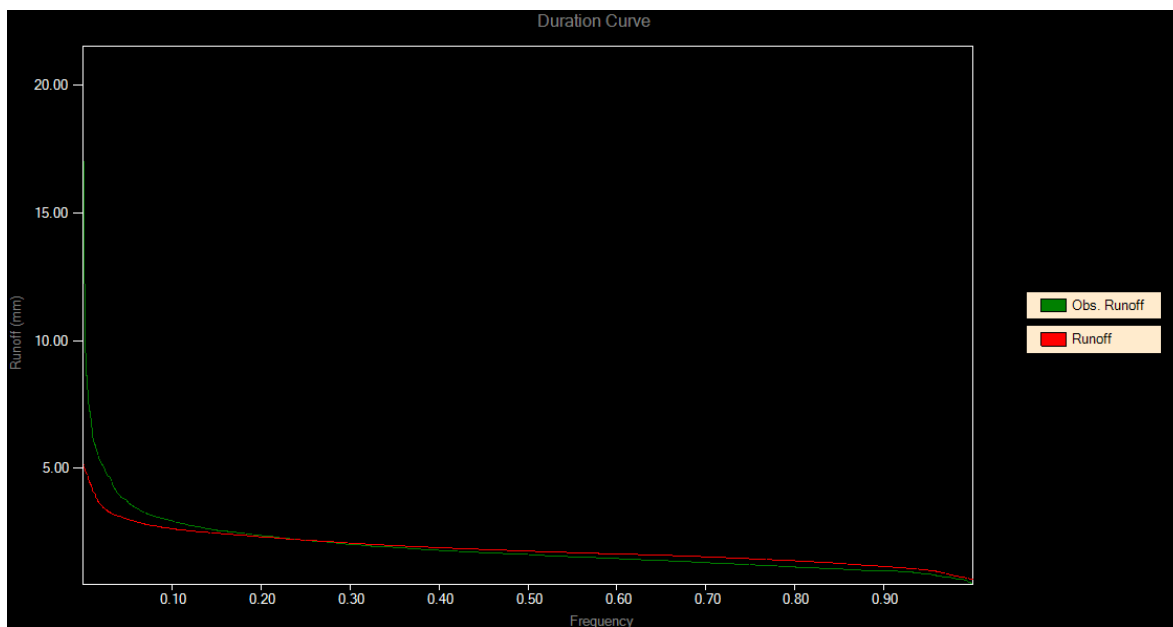
En cambio en el modelo AWBM se tiene un valor de NSE bueno de calibración, no obstante en la validación este buen ajuste no se denota de la misma manera, a pesar de tener un acercamiento en la curva de duración de la calibración (Grafica 44), a su vez la diferencia entre lo calculado y lo simulado no es tan significativa (Grafica 45) en excepción de los caudales más altos donde la diferencia incrementa. En la validación (Grafica 46) esta diferencia es muy alta. Una posible causa a lo anterior es la diferencia de tiempo en que se realiza la validación, la cual es 5 años después de calibrar, y en este lapso de tiempo el uso del suelo cambió el comportamiento de la cuenca para la administración de la escorrentía al sobre estimar el calculado.

Grafica 43 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en datos en la validación del modelo Sacramento para los datos sin alterar



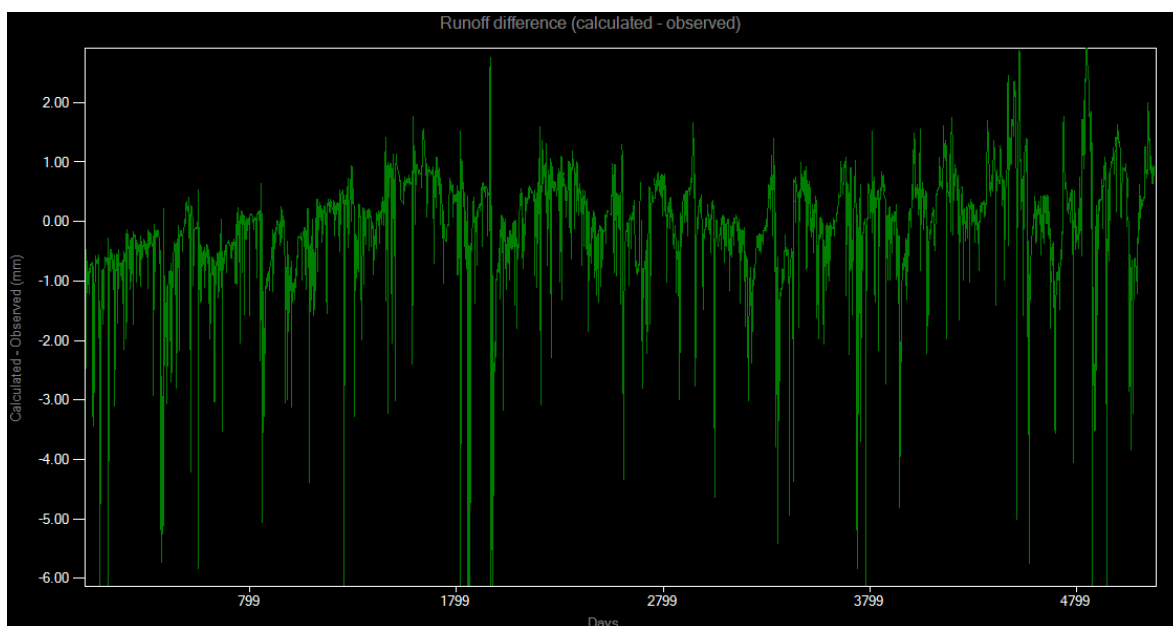
Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 44 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en datos en la calibración del modelo AWBM para los datos sin alterar



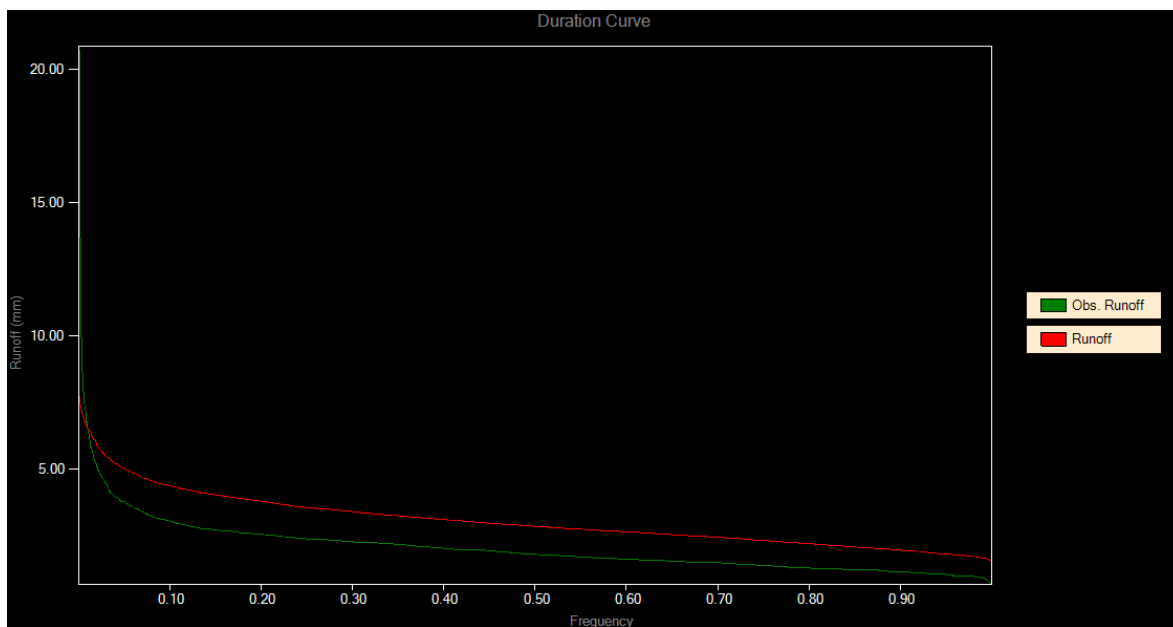
Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 45 diferencia de escorrentía (calculada - simulada) cuenca del rio las Ceibas en datos en la calibración del modelo AWBM para los datos sin alterar



Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 46 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en datos en la validación del modelo AWBM para los datos sin alterar



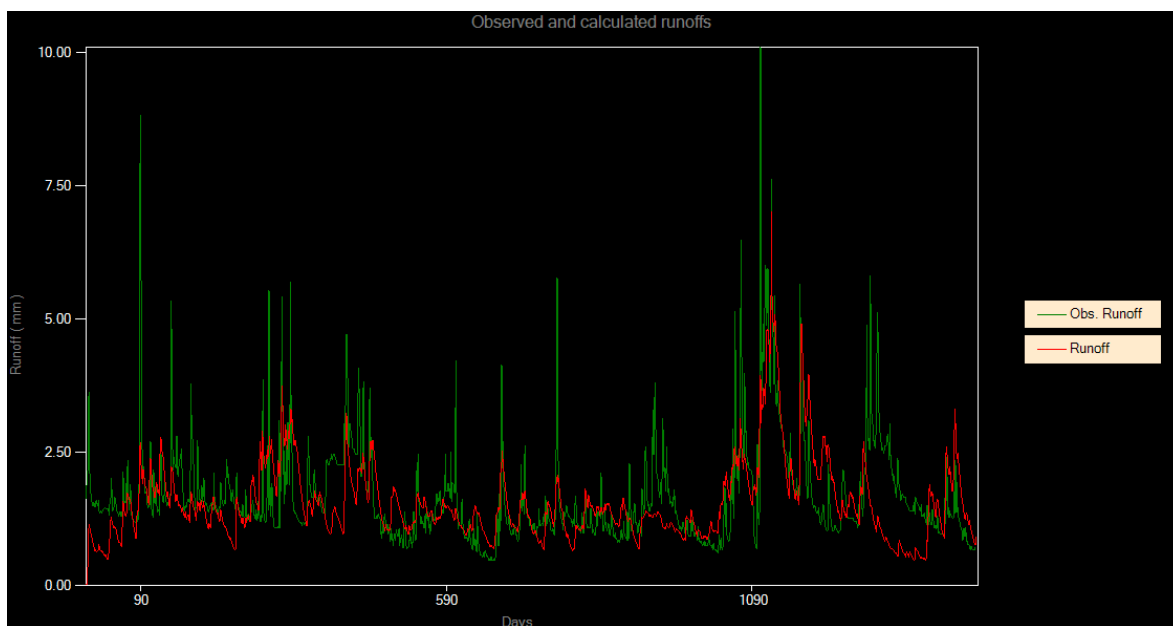
Fuente: (Boughton et al. 2003)

#### 4.2.2.2 Fenómeno del Niño

Ambos modelos obtienen un NSE similar, pero en la validación no se obtiene un resultado favorable. A pesar de tener un buen acercamiento de la escorrentía calculada a la observada en la calibración del modelo Sacramento como muestra la Grafica 47, en la validación la misma grafica es bastante pobre, la escorrentía calculada no representa en absoluto la observada.

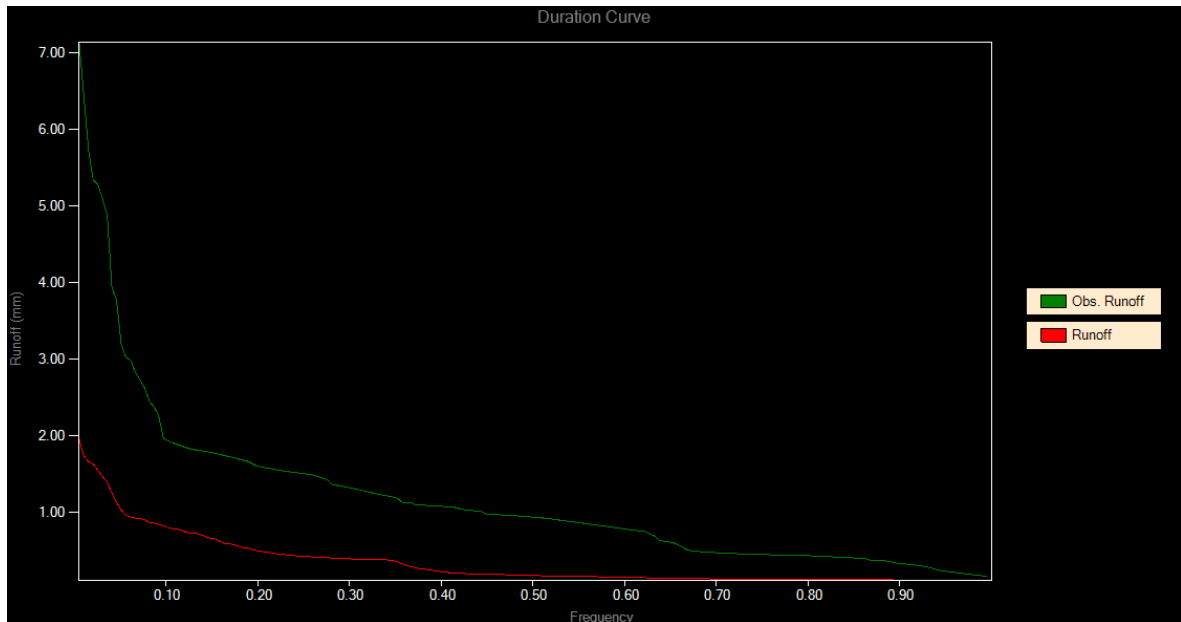
Por otro lado el modelo AWBM, la curva de duración de la validación (Grafica 48) el modelo exagera la escorrentía calculada por debajo del observado, representando incorrectamente la cuenca. Para finalizar, no es deseable representar la cuenca para la evaluación hídrica con ninguno de estos modelos en tiempos recientes.

Grafica 47 Observado y calculado Vs tiempo cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo Sacramento para fenómeno del Niño



Fuente:(Boughton et al. 2003)

Grafica 48 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la validación del modelo AWBM para el fenómeno del Niño



Fuente: (Boughton et al. 2003)

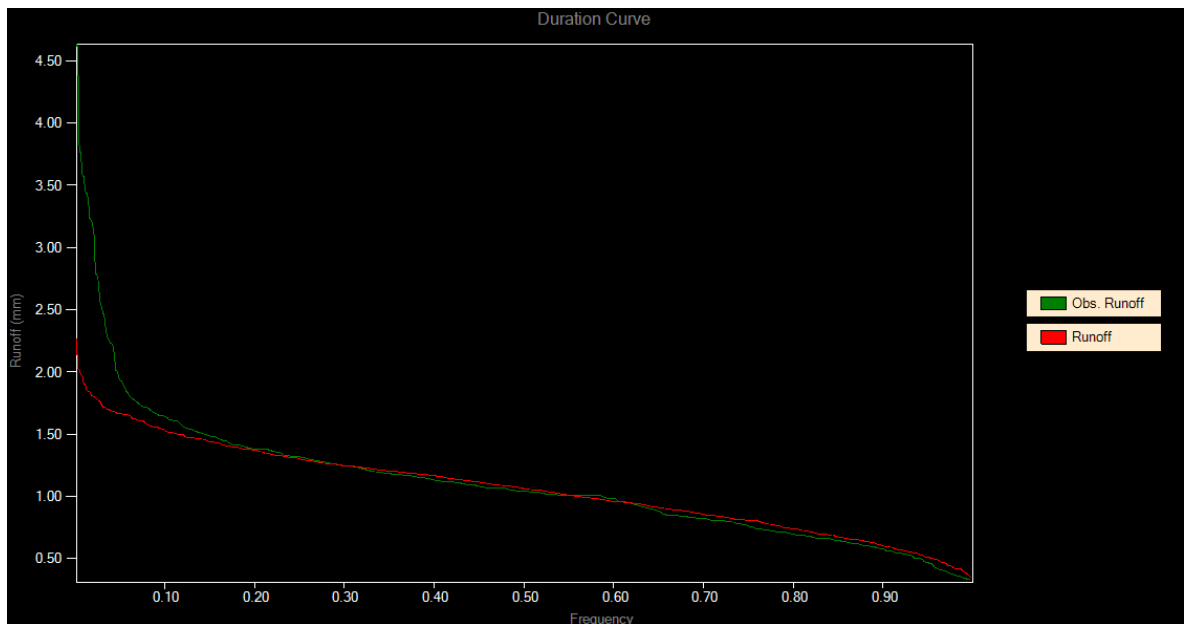
#### 4.2.2.3 Transición de fenómenos Niño - Niña

El NSE de ambos modelos en la calibración da un valor similar, pero bajo, en cambio la validación no contrasta a la emanada en la calibración, con valores muy por debajo a 0. Hay que destacar un buen ajuste a lo largo de la escorrentía baja y media en la calibración del modelo Sacramento, (Grafica 49) en el 15% de caudales más altos es sub estimada la escorrentía, y esto no se refleja en la validación (Grafica 50), y no es posible asemejarlo a lo observado, teniendo en cuenta que el modelo subestima el 90% la escorrentía y en los caudales más altos los exagera, estos picos suceden al final de todo el periodo de validación.

Simultáneamente en el modelo AWBM la escorrentia observada y simulada en la línea de tiempo no tiene similitud alguna, pero el buen ajuste es debido a que cerca del 65% de la escorrentía calculada es muy similar a la observada (Grafica 51) dejando el resto con problemas de sobre y sub estimación en los extremos de la gráfica. En la validación ocurre una complicación similar a lo obtenido en Sacramento, en discrepancia con el anterior los caudales más altos no los exagera, pero son razonables y por esta razón el NSE no resulta en un valor tan desmedido para el tamaño de la cuenca.

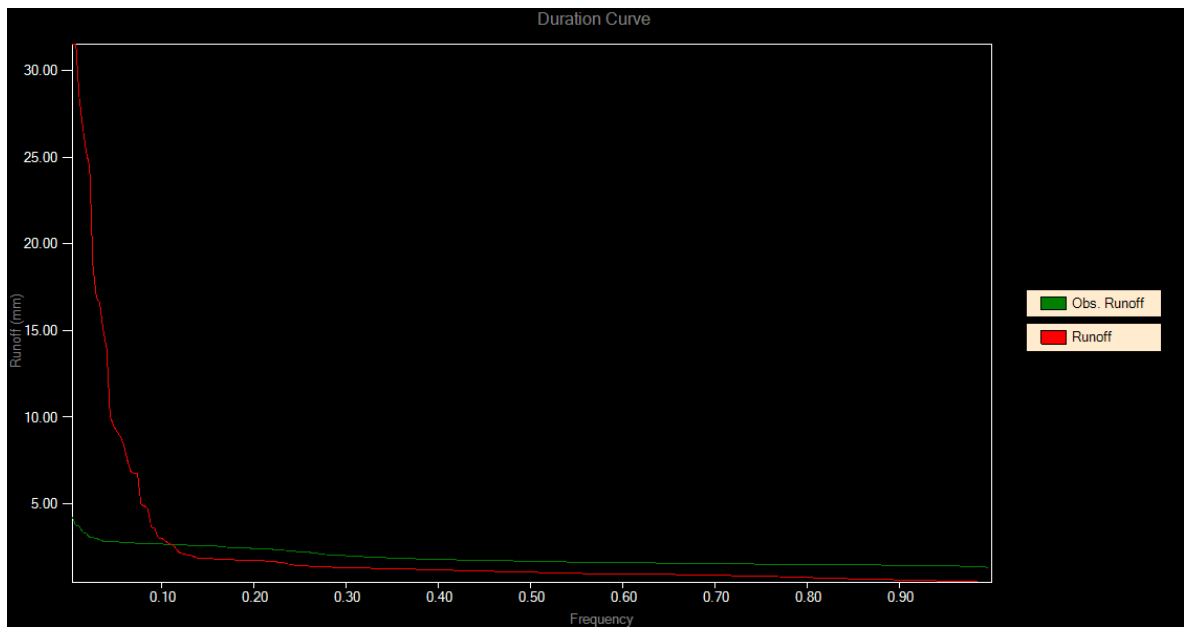


Grafica 49 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo Sacramento para la transición de fenómenos Niño - Niña



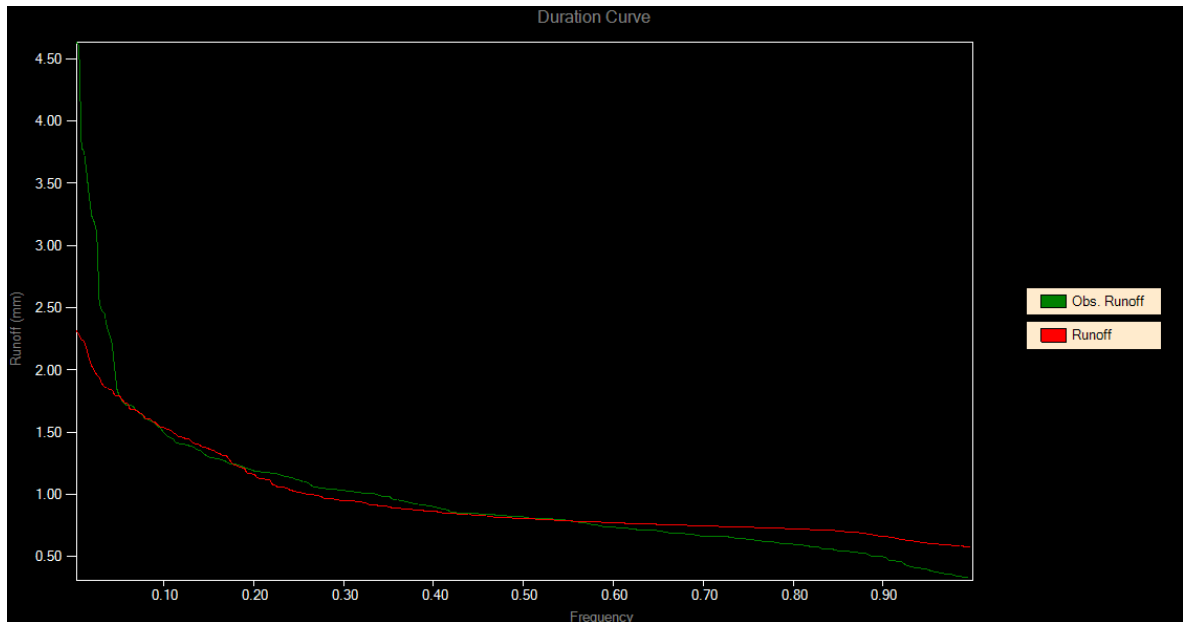
Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 50 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la validación del modelo Sacramento para la transición de fenómenos Niño - Niña



Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 51 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo AWBM para la transición de fenómenos Niño - Niña



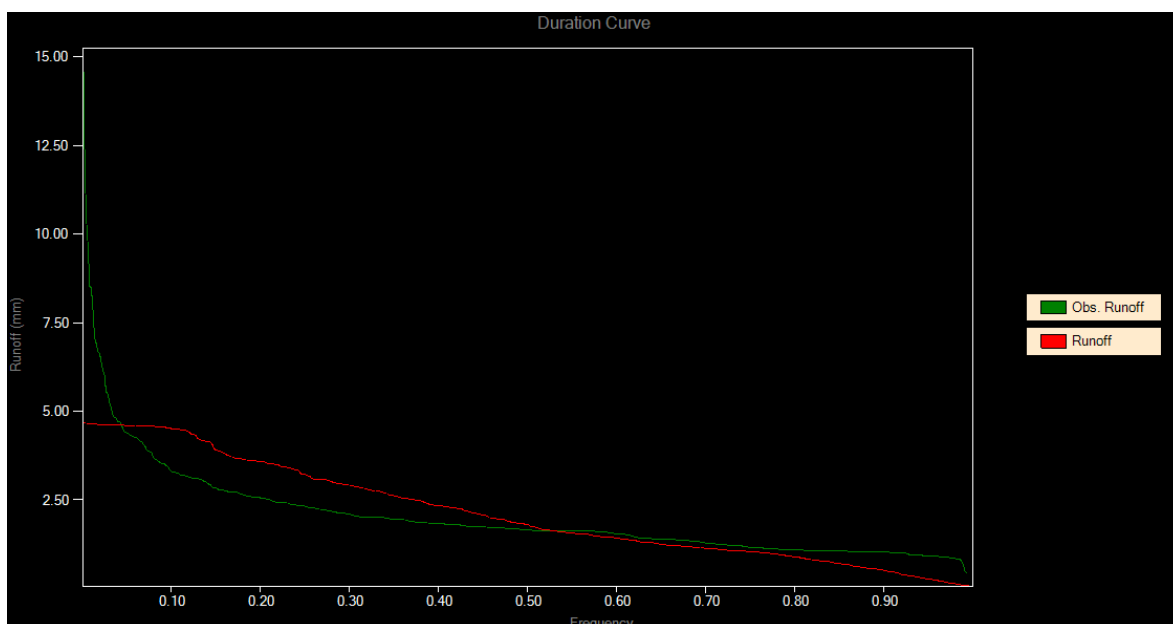
Fuente: (Boughton et al. 2003)

#### 4.2.2.4 Fenómeno de la Niña

La causa de que ningún modelo se ajuste a la esorrentía producida en la cuenca es la descarga desmedida de esorrentía resultante del modelo, ya que en la mayoría del periodo calculado este es inferior al observado. Una justificación a lo anterior se puede ver en la curva de duración de calibración del modelo Sacramento (Grafica 52) en la que cerca del 50% de los caudales más bajos es sub estimados, luego rodeando el 50% de los más altos es sobre estimado, y se intersecta con la curva de la esorrentía observada nuevamente creando una meseta de los datos.

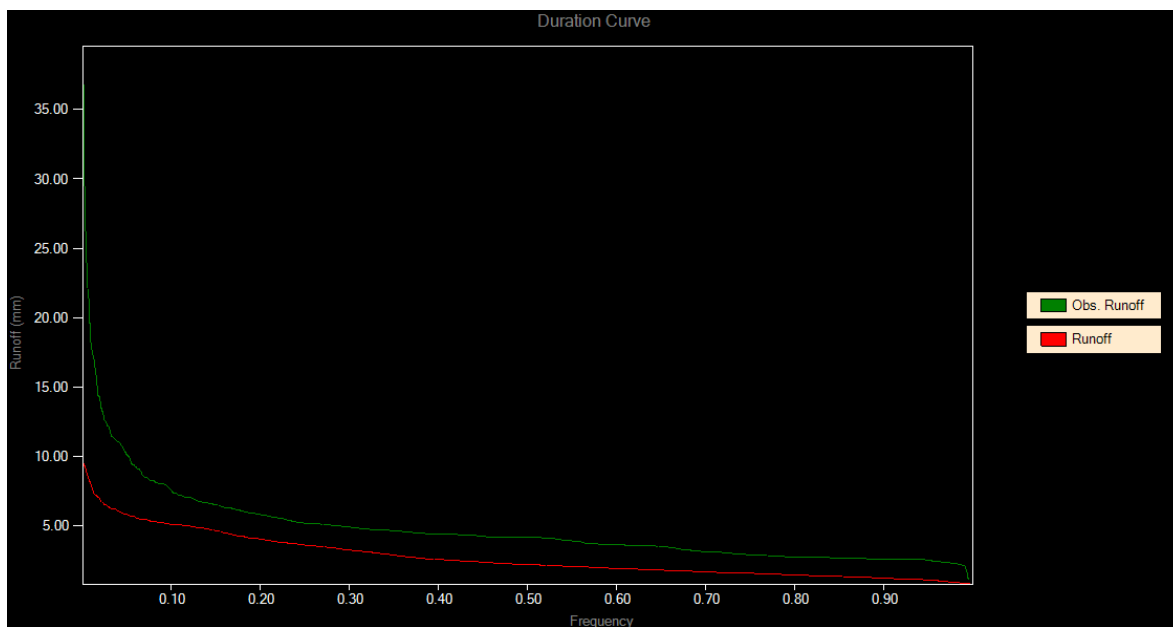
Mientras tanto en el modelo AWBM, por la curva de duración de la calibración (Grafica 53) sub estima toda la esorrentía producida por la cuenca haciendo imposible entonces utilizar alguno de los dos modelos en los diseños de estructuras hidráulicas o estimación de caudales altos.

Grafica 52 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo Sacramento para el fenómeno de la Niña



Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 53 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo AWBM para el fenómeno de la Niña

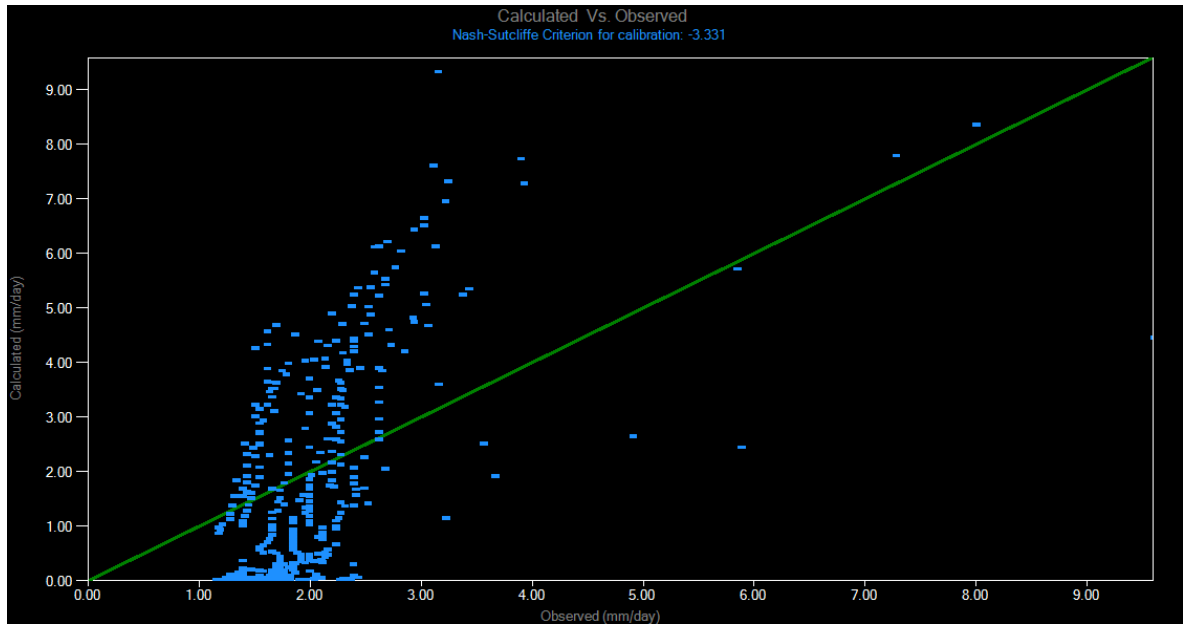


Fuente: (Boughton et al. 2003)

#### 4.2.2.5 Transición de fenómenos Niña - Niño

En este aspecto no hay mucho que resaltar, al contar solo con calibración y tener resultados deplorables, tales como la Grafica 53 donde una acumulación vertical de los puntos imposibilita obtener un mejor NSE.

Grafica 53 Calculado Vs Observado cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo AWBM para transición de fenómenos Niña - Niño



Fuente: (Boughton et al. 2003)

#### 4.2.2.6 Ocurrencia normal del clima

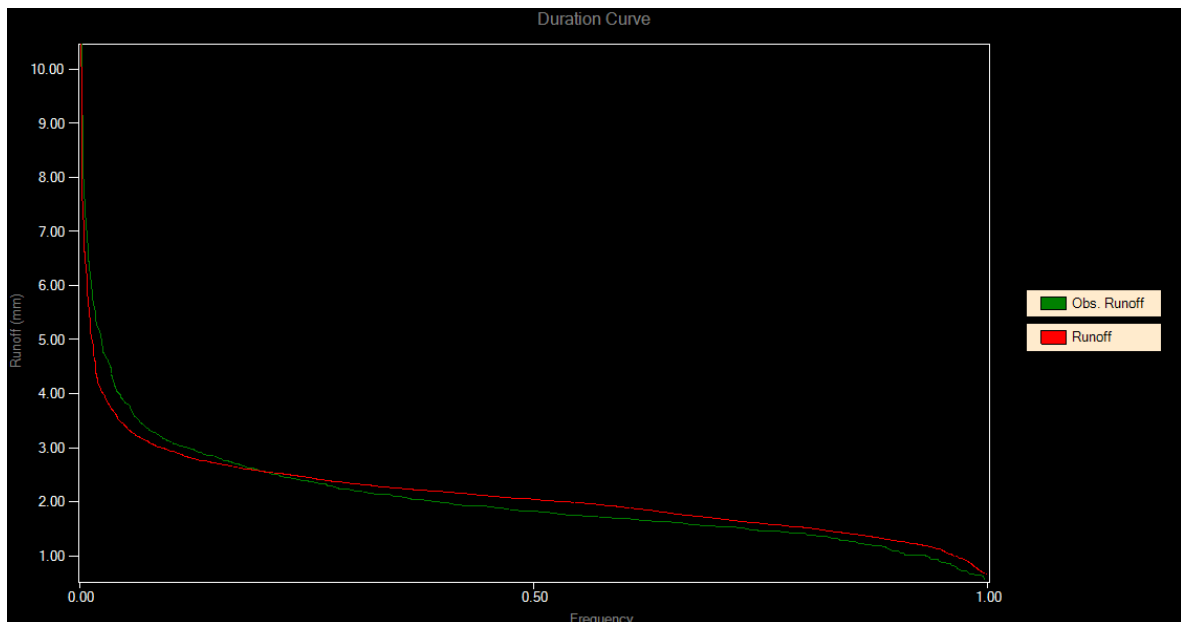
El modelo Sacramento no se adapta a la cuenca, pero considerando AWBM este tiene una adaptación adecuada, es conveniente confrontar los dos modelos. Sobre el modelo Sacramento se tiene un acercamiento muy bueno en la calibración, al hacer un acercamiento en la curva de duración de la escorrentía (Grafica 54), parte de la escorrentía la sobre estima, mientras que más del 20% de la escorrentía más alta es sub estimada, estas dos situaciones tiene en común que no es significativo lo calculado por el programa, dando un ajuste muy bueno. En la validación del mismo modelo (Grafica 55), aunque gran parte de los caudales son sobre estimados es prácticamente insignificante pese a tener un NSE por debajo de 0.

La agrupación de los puntos fue clave para un buen NSE del modelo AWBM (Grafica 56) en la calibración y validación del modelo, comparado con Sacramento, la dispersión de este es más alta. Y semejante a lo obtenido en la diferencia de escorrentía de la calibración (Grafica 57), y al hacer un acercamiento la diferencia de lo calculado y lo observado a lo largo de la línea de tiempo está por debajo de 0

pero muy cercano a este eje, así que el modelo tiende a sobre estimar la escorrentía. Algo semejante ocurre en la validación, el modelo sobre estima la escorrentía, pero esta es insignificante a la observada, dejando claro el buen ajuste que tiene el modelo AWBM en esta cuenca.

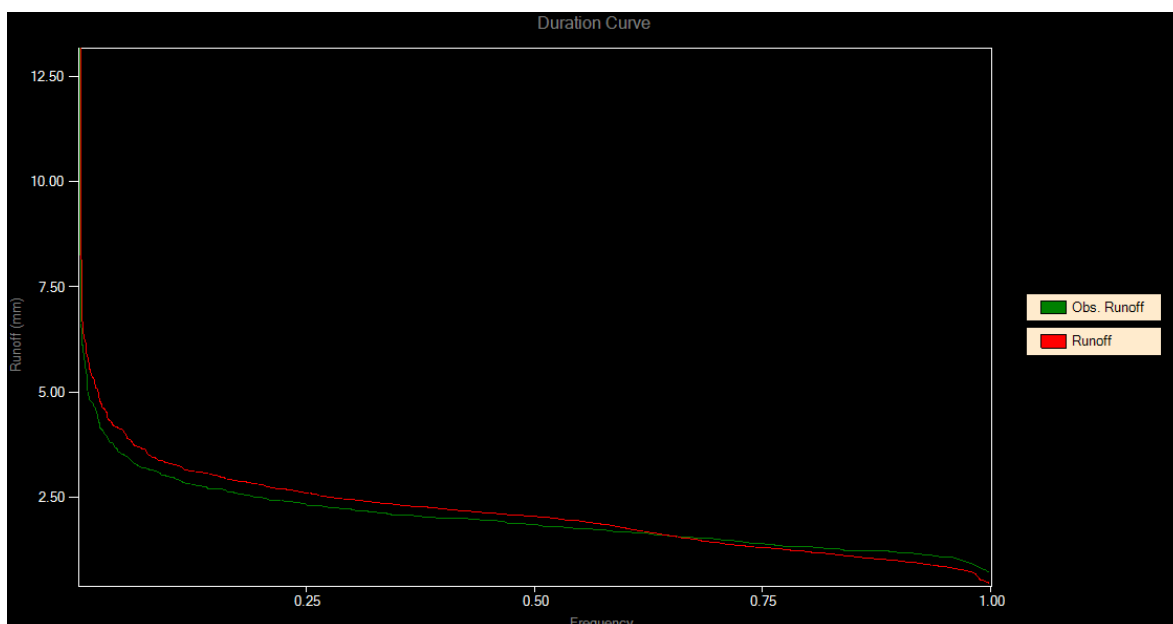
Se infiere que el mejor modelo para representar la cuenca es el modelo AWBM, pero este solo se puede aplicar en situaciones puntuales: el modelo a pesar de tener un buen ajuste, solo se puede aplicar para fenómenos normales de clima, por ende es posible calcular un caudal medio de la cuenca, pero para evaluación del recurso hídrico en otros aspectos climáticos o inclusive en la línea de tiempo, no es recomendable. Con el modelo es posible cuantificar caudales extremos en la cuenca considerando eventos normales del clima, pero es parte de un estudio más profundo en función del tipo de estructura hidráulica a diseñar o el periodo de retorno de diseño que se considere, en particular es por los altos resultados de la escorrentía máxima calculados en la calibración y validación de este. Otra aplicación es el cálculo de la escorrentía esperada por la cuenca si se tiene una base de datos relevante diaria actualizada para que el modelo pueda acomodarse a la situación en que se evalúe. Para finalizar es posible calcular el caudal medio obtenido en cualquier parte de la cuenca, pero no es recomendable utilizar este caudal para la concesión de aguas por parte de la corporación autónoma al estar calibrada para parámetros normales del clima, sin tener en cuenta fenómenos de poca precipitación, como lo es el fenómeno del Niño.

Grafica 54 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo Sacramento para ocurrencia normal del clima



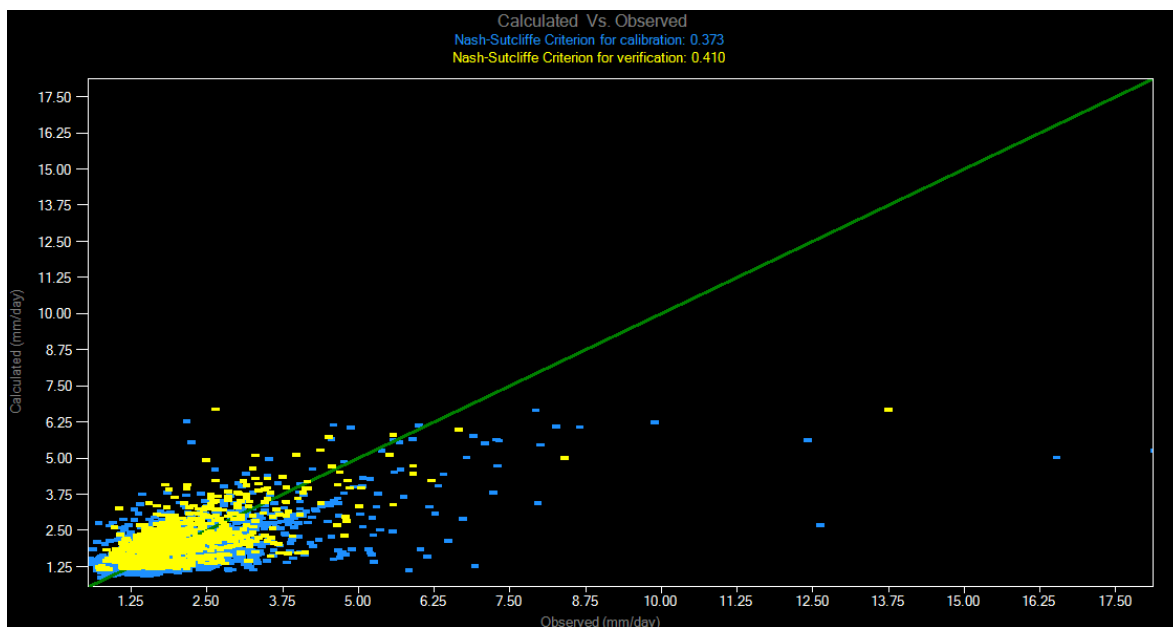
Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 55 Curva de duración cuenca del rio las Ceibas en la validación del modelo Sacramento para ocurrencia normal del clima



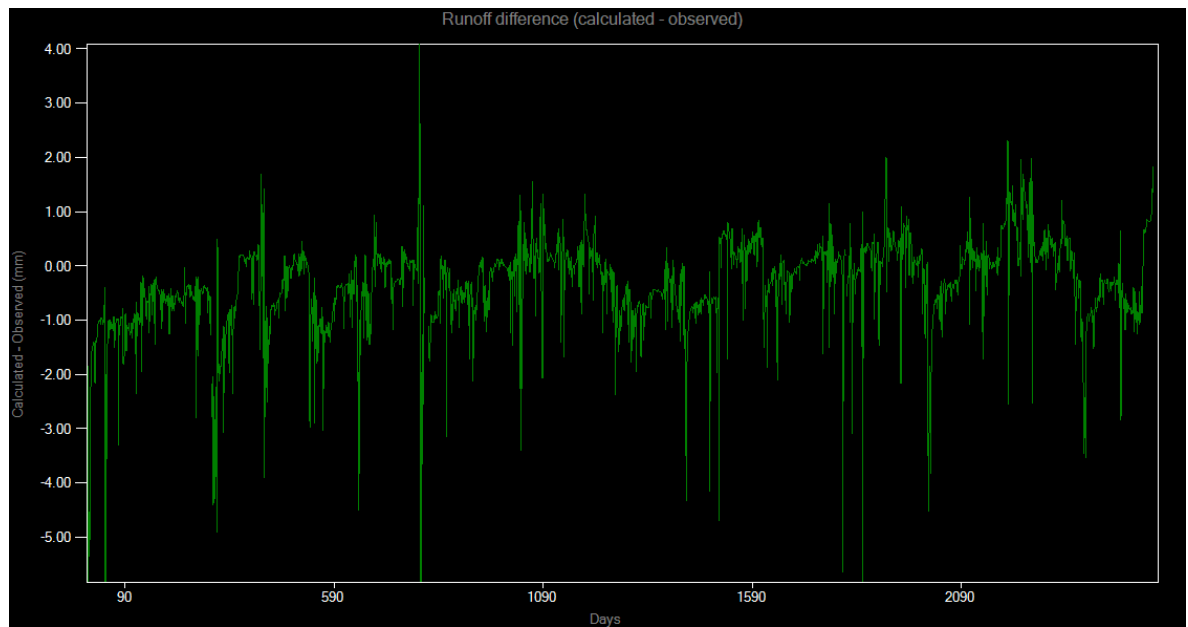
Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 56 Calibración Vs Validación cuenca del rio las Ceibas del modelo AWBM para ocurrencia normal del clima



Fuente: (Boughton et al. 2003)

Grafica 57 Diferencia de escorrentía cuenca del rio las Ceibas en la calibración del modelo AWBM para ocurrencia normal del clima



Fuente: (Boughton et al. 2003)

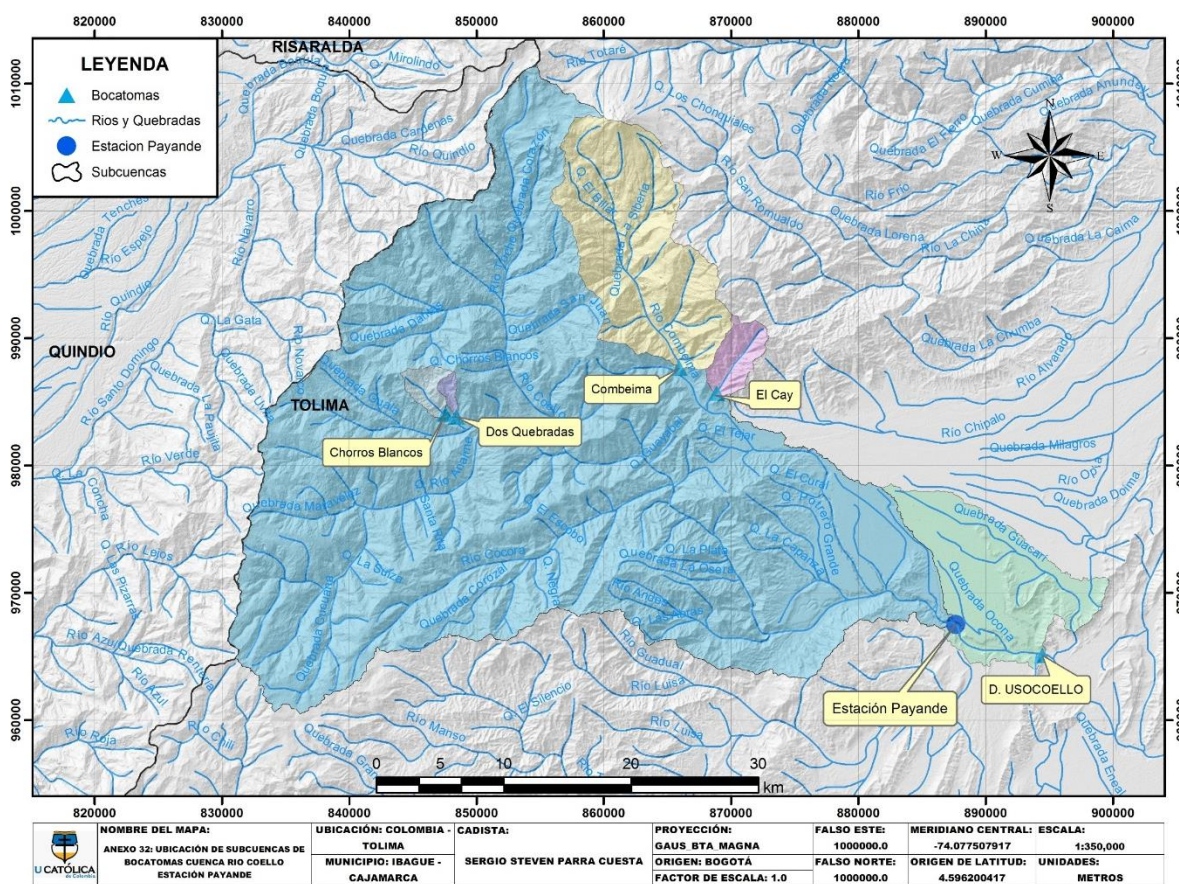


## 5. Evaluación del recurso hídrico en puntos de captación de aguas

Los días 23 y 24 de junio de 2019 se visitó distintos puntos de captación coordinada por personal que trabaja en las distintas empresas para el acceso a las bocatomas de los acueductos de Cajamarca – Tolima, Ibagué – Tolima, Neiva – Huila, y el distrito de riego USOCOELLO – Tolima. En esta visita se toma registro fotográfico del estado de la bocatoma y demás elementos constructivos que la componen también una referencia geográfica con ayuda de un GPS para proceder en el programa ArcGIS 10.5 a la delimitación de la cuenca que la abarca.

### 5.1 Cuenca del río Coello

Ilustración 50 Mapa de ubicación de puntos de captación de agua en la cuenca del río Coello



Fuente: Propia

Tabla 13 Ubicación bocatomas sobre la cuenca del rio Coello

Bocatoma	Municipio	Caudal ( $\frac{m^3}{s}$ )	Empresa	Altitud (m)	E	N
Chorros Blancos	Cajamarca	0.047	Acueducto de Cajamarca	2205	847540.1358	984034.9282
Dos Quebradas	Cajamarca	0.022	Acueducto de Cajamarca	2069	848402.9194	983808.7024
Combeima	Ibagué	1.4	IBAL	1465	865913.7643	987649.1218
El Cay	Ibagué	0.1	IBAL	1440	868868.1401	985684.286
USOCOELLO	Espinal	9.64	USOCOELLO	475	894444.9698	965091.1467

Fuente: Propia

El modelo a aplicar es Sacramento, y se evaluará en las distintas cuencas para dos situaciones distintas: el modelo calibrado para fenómenos del Niño en el cual se estima los caudales mínimos y el modelo calibrado con el fenómeno de la Niña para determinar el caudal medio en épocas de alta precipitación que produce la cuenca. En la Tabla 13 se encuentra la ubicación geográfica en el sistema de coordenadas GAUSS MAGNA origen Bogotá de las bocatomas a las cuales se les efectuará la simulación y el caudal recolectado en cada una, en la Ilustración 50 se delimitan las sub cuencas de cada bocatoma.

#### 5.1.1 Cajamarca

El municipio cuenta con dos bocatomas, donde principalmente se toma agua de la Bocatoma Chorros blancos, con un caudal de suministro de 47 l/s, y es llevado por tubería hasta la planta de tratamiento cerca de Cajamarca la cual está diseñada para un caudal de 55 l/s. Por problemas en la Bocatoma en épocas de alta intensidad de lluvia, es obligado a suspender la recolección de agua en este punto, por ello se conecta la Bocatoma Dos quebradas con un caudal de suministro de 22 l/s, la cual tiene más problemas en su tratamiento.

##### 5.1.1.1 Bocatoma Chorros blancos

##### 5.1.1.1.1 Ubicación y características

La bocatoma se encuentra ubicada en jurisdicción del municipio de Cajamarca en la vereda Altamira, en las coordenadas geográficas latitud 4° 27' 02" y longitud 75° 27' 04" en la Ilustración 51 se detalla cómo fue construida. Una cascada cae de una altura aproximada de 7 metros, donde un tanque que disipa la energía del agua al caer, también funciona como control de erosión, el agua al rebosar el tanque desborda por un canal y lateral a este se encuentra el acceso del agua (Ilustración 52) donde la rejilla lateral se encuentra en buen estado. Frente a la captación de agua se encuentra un desarenador cubierto, está en buen estado, como se ve en la Ilustración 53. El control de erosión se justifica ya que al frente de la bocatoma pasa

una vía terciaria que comunica a este sitio. Este sitio es turístico por su espesa naturaleza circundante a la bocatoma y la destacada cascada. (Corporación Autónoma Regional del Tolima 1995)

Ilustración 51 Bocatoma Chorros blancos - Cajamarca



Fuente: Propia

Ilustración 52 Rejilla lateral de captación de agua Bocatoma Chorros Blancos



Fuente: Propia



### Ilustración 53 Desarenador Bocatoma Chorros Blancos



Fuente: Propia

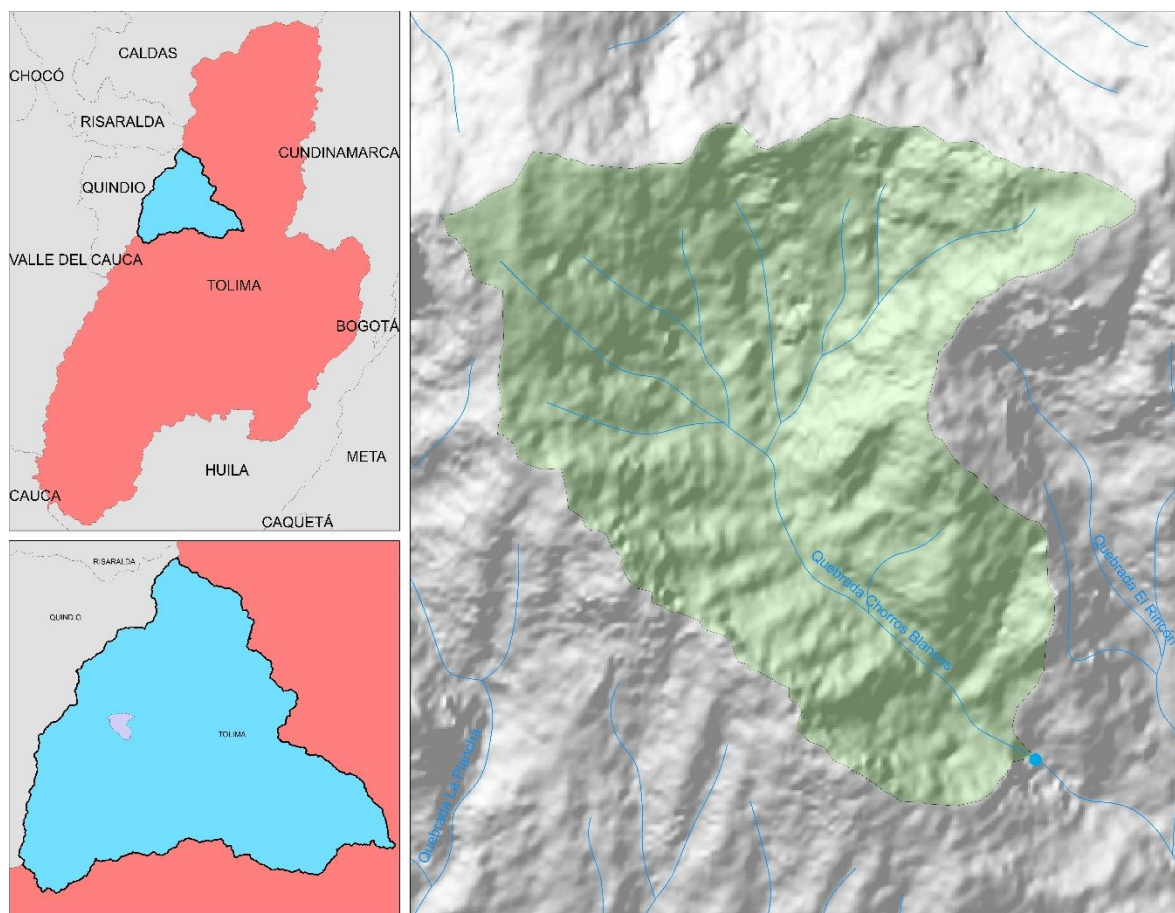
El agua captada actualmente es de 47 L/s según los administradores del acueducto, pero según la resolución 2249 de 1995 dice textualmente en el artículo primero “Otorgar al MUNICIPIO DE CAJAMARCA, concesión de aguas de la quebrada de la quebrada Chorros Blancos en cantidad de 79.38 L/s para beneficio del acueducto municipal de Cajamarca”. Por lo tanto el caudal captado es menor al concesionado.

De acuerdo con la información suministrada por los responsables de la administración del acueducto de Cajamarca, una bocatoma en este mismo sitio fue seriamente dañada por una creciente, la cual obligo a su reconstrucción y la visitada es la bocatoma que se encuentra en funcionamiento actualmente.

#### 5.1.1.1.2 Simulación y análisis de resultados

La cuenca resultante hasta este punto se muestra en la Ilustración 54, el área que corresponde a esta cuenca es de 9.54 km<sup>2</sup>. La caracterización de la precipitación y la evapotranspiración diaria viene dada únicamente por la estación Cajamarca.

Ilustración 54 Ubicación Cuenca Bocatoma Chorros Blancos - Cajamarca

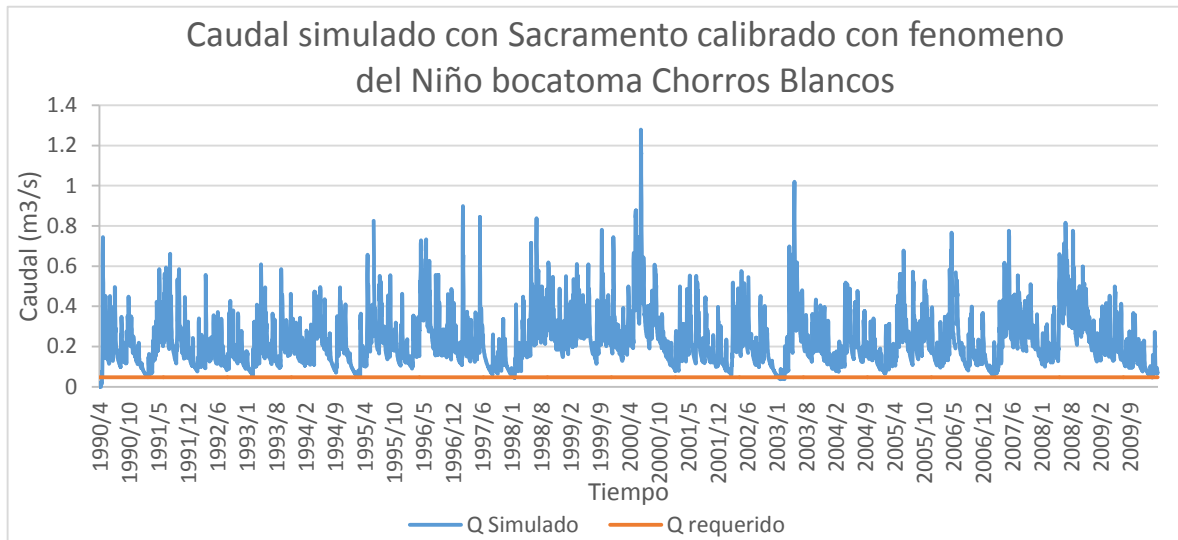


Fuente: Propia

En la estación de registro de precipitación se presentan intermitencia en la lectura de datos en varios meses, por ello se limita el periodo de simulación entre el 1 de abril de 1990 y el 24 de marzo de 2010. En el caudal simulado con el modelo Sacramento calibrado con fenómeno del niño, (Grafica 58) a pesar de ser una cuenca pequeña, esta produce caudal suficiente para abastecer el mínimo solicitado, este tiene déficits que afecta los meses de enero, febrero y marzo primordialmente. Las fechas donde se encuentra déficit de agua son: 29/01/1998 – 02/02/1998 y 25/01/2003 – 09/03/2003. A pesar de que no son muchas las épocas en las que el caudal está por debajo del solicitado, en la Grafica 58 se detallan algunos periodos en donde el caudal producido es casi que igual al solicitado. Al tener este problema además de no tomar en cuenta el caudal ambiental (es parte de otro estudio), es necesario el uso de la Bocatoma Dos quebradas para obtener agua también de este sitio y suplir las necesidades que tenga el municipio sin interrupciones en los periodos de 17/02/1991 – 04/03/1991, 06/02/1995 – 03/03/1995, 18/01/1998 – 02/02/1998, 15/01/2003 – 08/03/2003, 25/01/2010 –

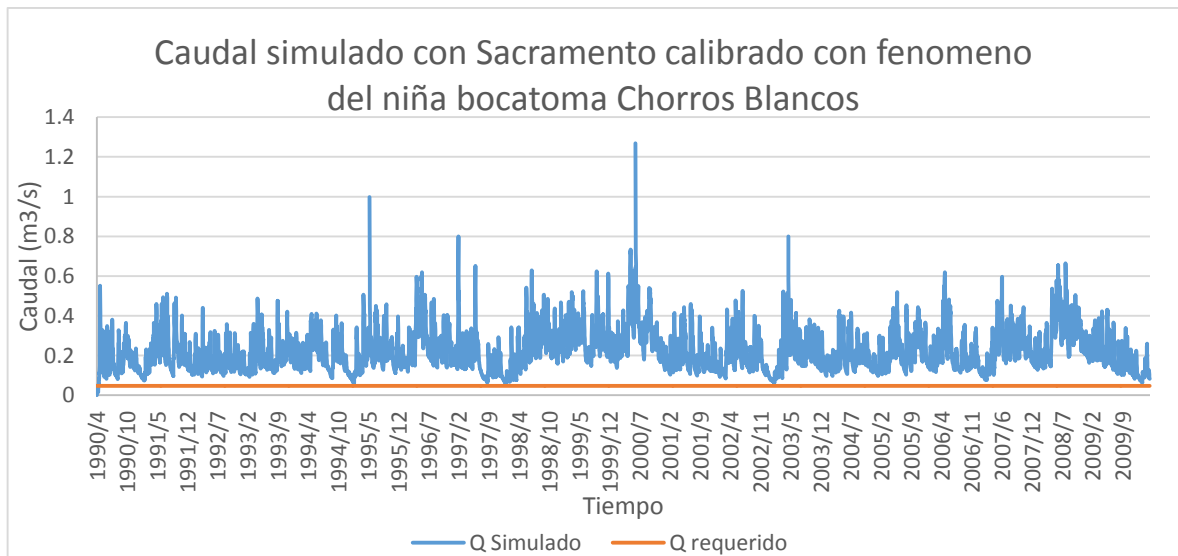
19/02/2010 si se supone un caudal ecológico de 10 l/s (supuesto para encontrar estos periodos).

**Grafica 58 Caudal simulado en bocatoma Chorros Blancos con Sacramento calibrado con fenómeno del Niño**



Fuente: Propia

**Grafica 59 Caudal simulado en bocatoma Chorros Blancos con Sacramento calibrado con fenómeno de la Niña**



Fuente: Propia

El caudal medio en el fenómeno del niño es de  $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ , no obstante, la Grafica 59 puede ser útil a la hora de evaluar el caudal que pueda afectar la captación y el diseño de en obras de contingencia para evitar daños o la destrucción de la misma, el modelo simula caudales cercanos a  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$  inclusive superiores en las fechas de 04/06/1995 y el 20/06/2000. Cabe destacar que el caudal máximo propuesto puede variar dependiendo del caudal de diseño de la estructura, y los diseños hidráulicos no se deben basar por lo dicho en este trabajo, es necesario un estudio más profundo para encontrar los caudales mas altos.

#### 5.1.1.2 Bocatoma Dos quebradas

##### 5.1.1.2.1 Ubicación y características

Por problemas en la ubicación topográfica de esta no fue posible acceder hasta este punto y tomar registro fotográfico, así que se toma únicamente referencia geográfica del sitio, esta se encuentra aproximadamente (se toma sobre la vía que la comunica) en latitud  $4^\circ 26' 55''$  y longitud  $75^\circ 26' 33''$ , se afirma que en este punto se capta  $22 \text{ l/s}$ .

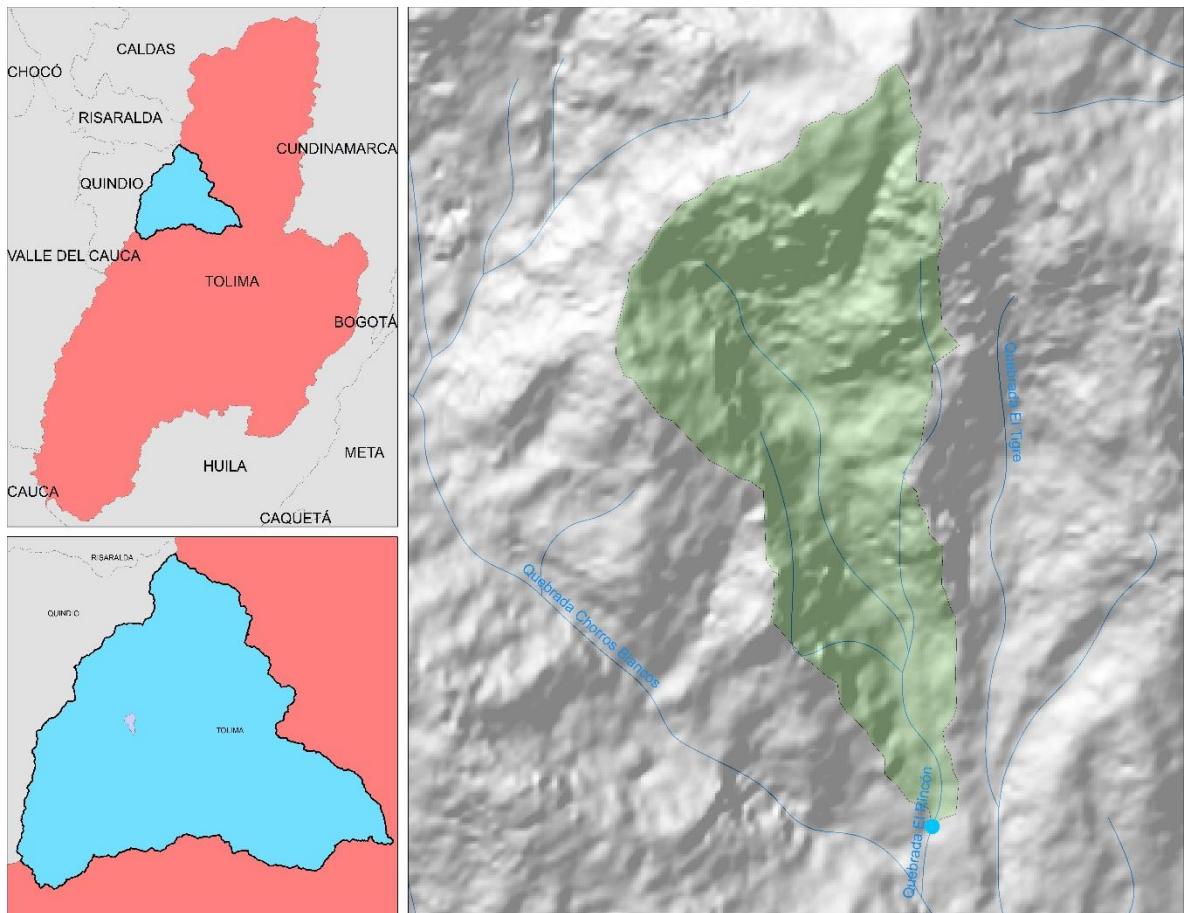
##### 5.1.1.2.1 Simulación y análisis de resultados

La cuenca mostrada en la Ilustración 55 correspondiente a la bocatoma Dos quebradas cuenta con un área de  $3.1 \text{ km}^2$ , se encuentra al oriente de la bocatoma Aguas Claras, por ende comparte las mismas estaciones que identifican la precipitación y características climáticas de la cuenca.

Según lo comentado por los administradores del acueducto, esta bocatoma se destina para suministrar agua al municipio de Cajamarca en situaciones donde el caudal en la bocatoma principal Chorros Blancos no se pueda tomar ya sea por caudales muy altos o muy bajos. Al estar junto a la cuenca Chorros Blancos, se cuenta con la misma disponibilidad de datos de precipitación. Bajo la evaluación del recurso hídrico esta bocatoma es conveniente tomar el agua en casi cualquier periodo del año según lo simulado con calibración en fenómeno del Niño (Grafica 60), excepto en los meses de enero, febrero y marzo primordialmente, específicamente en las fechas de 12/02/1991 – 03/03/1991, 16/02/1993 – 22/02/1993, 31/01/1995 – 03/03/1995, 07/01/1998 – 02/02/1998, 03/03/2002 – 07/03/2002, 03/01/2003 – 09/03/2003, 07/02/2007 – 18/02/2007, 14/01/2010 – 18/02/2010. Igual se comentó con la Bocatoma Chorros blancos, en los periodos de déficit se puede suplir la necesidad del acueducto con las dos bocatomas. Se aclara que estos periodos pueden aumentar si se considera el caudal ecológico, pero eso es parte de otro estudio para calcularlo.

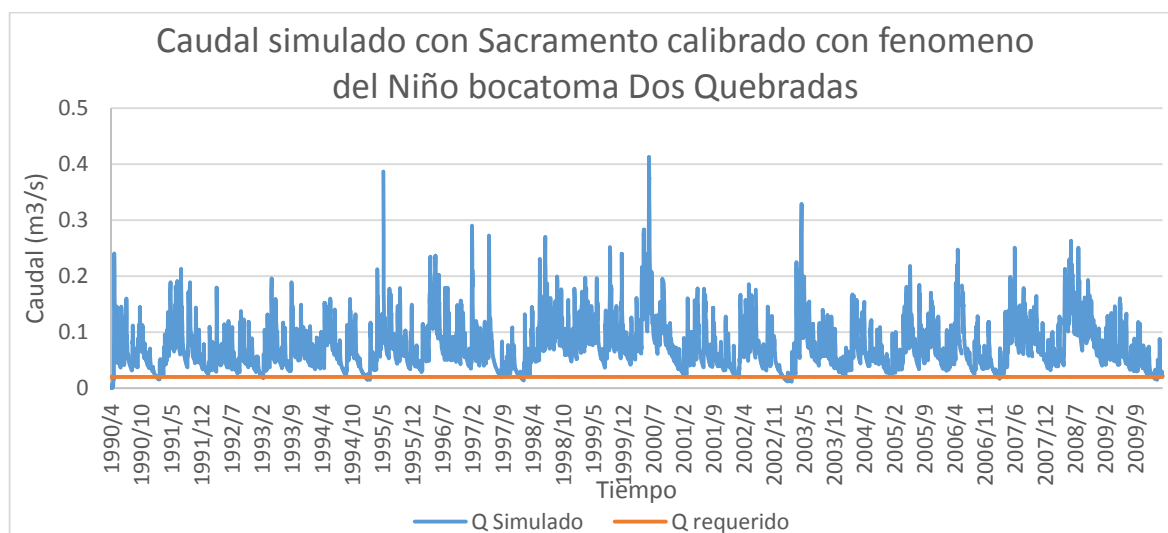


Ilustración 55 Cuenca bocatoma Dos Quebradas - Cajamarca



Fuente: Propia

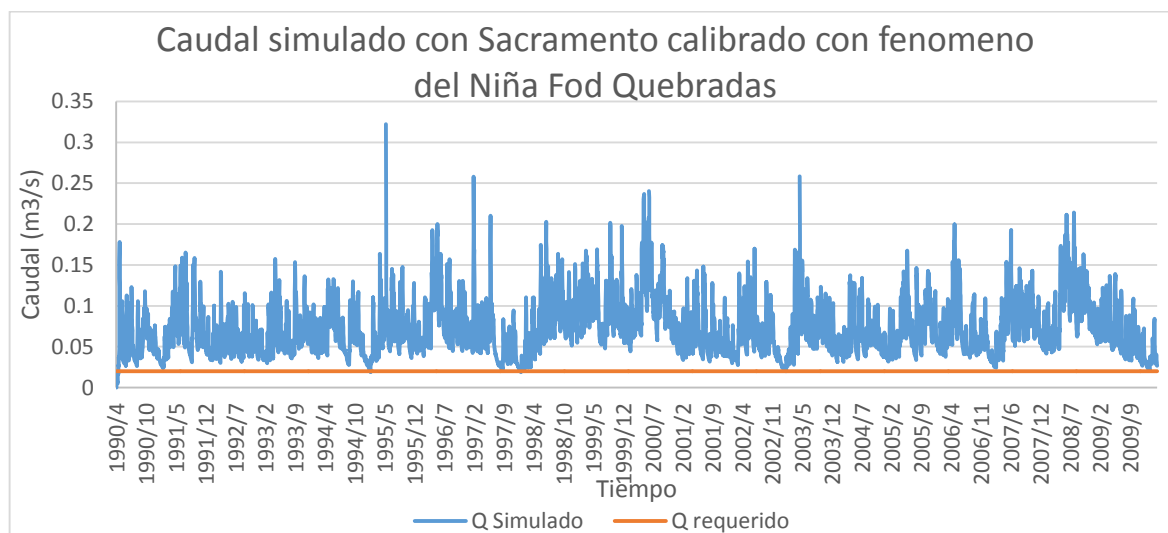
Grafica 60 Caudal simulado en bocatoma Dos Quebradas con Sacramento calibrado con fenómeno del Niño



Fuente: Propia

Mientras que evaluando la cuenca con el modelo calibrado en el fenómeno de la Niña (Grafica 61) se obtiene un caudal medio 71 L/s, no es tan alto pero si es importante revisar los caudales pico simulados y el diseño de la bocatoma para determinar que tanto afecta los caudales más altos, y si puede provocar algún daño.

Grafica 61 Caudal simulado en bocatoma Dos Quebradas con Sacramento calibrado con fenómeno de la Niña



Fuente: Propia

A pesar de la estructura dispuesta en la bocatoma Chorros Blancos contiene un tanque para disipar la energía, es de vital importancia para la prevención de daños revisar con los caudales altos simulados como afecta el tanque y si pueden ocurrir daños serios que puedan inducir el cierre y reconstrucción de esta. En caso de tener problemas con los caudales más altos, es recomendable diseñar y construir una estructura que desvíe parte del cauce y dar capacidad de la bocatoma para captar agua, considerando que el caudal requerido no puede ser suministrado por la bocatoma Dos Quebradas totalmente.

### 5.1.2 Ibagué

La ciudad de Ibagué cuenca actualmente con 5 bocatoma, de las cuales 2 se encontraban en servicio el día de la visita y fueron visitadas 3.

#### 5.1.2.1 Bocatoma El Cay Antigua

##### 5.1.2.1.1 Ubicación y características

Esta antigua bocatoma ubicada en la vereda Cay, en jurisdicción de la ciudad de Ibagué en latitud 4° 27' 51" y longitud 75° 15' 33" y se encuentra consignado en la resolución 325 de 1999 en el artículo primero "Otorgar a la Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado S.A. E.S.P. Oficial IBAL S. A. concesión de aguas de la quebrada Cay, en cantidad de 240.58 l/s y/o 80% del caudal disponible en el sitio de captación" (Corporación Autónoma Regional del Tolima 1999b) pero debido a una nueva bocatoma aguas arriba, esta bocatoma no se encuentra en servicio. Esta cuenta en medianas condiciones, con falta de mantenimiento en los canales de aducción al tener maleza en áreas sin cubrimiento. La estructura de captación se ve en la Ilustración 56.

Esta bocatoma es de fondo como esta en la Ilustración 57, y el agua se transmite por un canal de aducción semi-cubierto, ubicado al lateral de la quebrada el Cay, tal se muestra en la Ilustración 56, donde es llevado al desarenador que se encuentra vacío al no encontrarse en servicio la bocatoma, esta se encuentra en Ilustración 58 y el estado es bueno.



Ilustración 56 Bocatoma el Cay Antigua - Ibagué



Fuente: Propia

Ilustración 57 Rejilla de fondo Bocatoma el Cay Antigua



Fuente: Propia



### Ilustración 58 Desarenador Bocatoma el Cay Antigua



Fuente: Propia

#### 5.1.2.2 Bocatoma El Cay Nueva

##### 5.1.2.2.1 Ubicación y características

Esta bocatoma está ubicada a aproximadamente 210 metros aguas arriba de la bocatoma antigua en latitud  $4^{\circ} 27' 56''$  y longitud  $75^{\circ} 15' 30''$ , esta fue construida en el año 2018 y esta se encuentra en funcionamiento, toma alrededor de 100 l/s de la quebrada el Cay y se lleva a la planta de tratamiento de agua potable la Pola en Ibagué. En la Ilustración 59 se observa las rejillas laterales de captación, las cuales se encuentran en buenas condiciones, la forma de captar el agua es desviando parte del cauce natural de la quebrada, en el lugar se encuentra el desarenador de dos tanques en la Ilustración 60 la cual también se encuentra en buen estado y funcionales.

El punto de captación se encuentra relativamente cerca a el rio Combeima, esta cuenta con un área de  $17.7 \text{ km}^2$ . Ya que se tienen dos bocatoma demasiado cerca, se analiza la nueva bocatoma debido a ser más crítica por dos razones: el área aferente de la cuenca es menor a la antigua y la nueva bocatoma se construyó con el fin de reemplazar la antigua bocatoma por su estado estructural. La cuenca delimitada se encuentra en la Ilustración 61:



Ilustración 59 Rejillas Bocatoma el Cay Nueva



Fuente: Propia

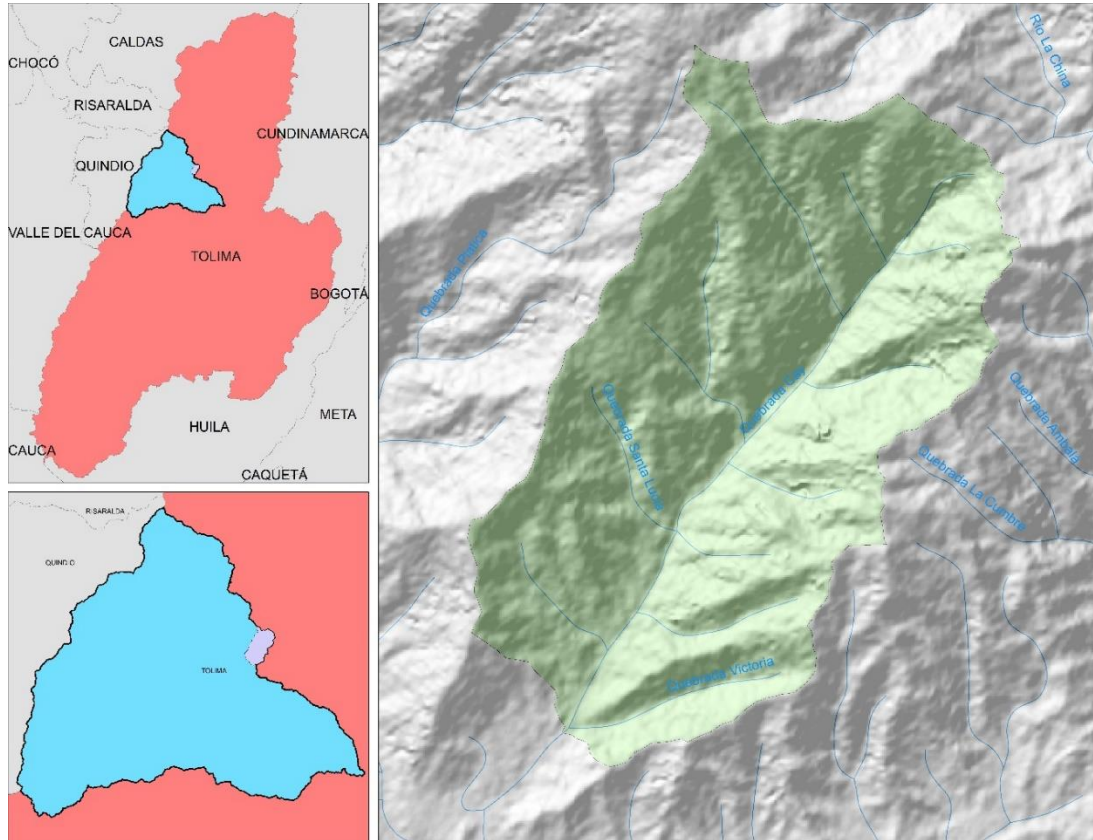
Ilustración 60 Desarenador Bocatoma el Cay Nueva



Fuente: Propia

#### 5.1.2.2.2 Simulación y análisis de resultados

Ilustración 61 Cuenca Bocatoma el Cay - Ibagué



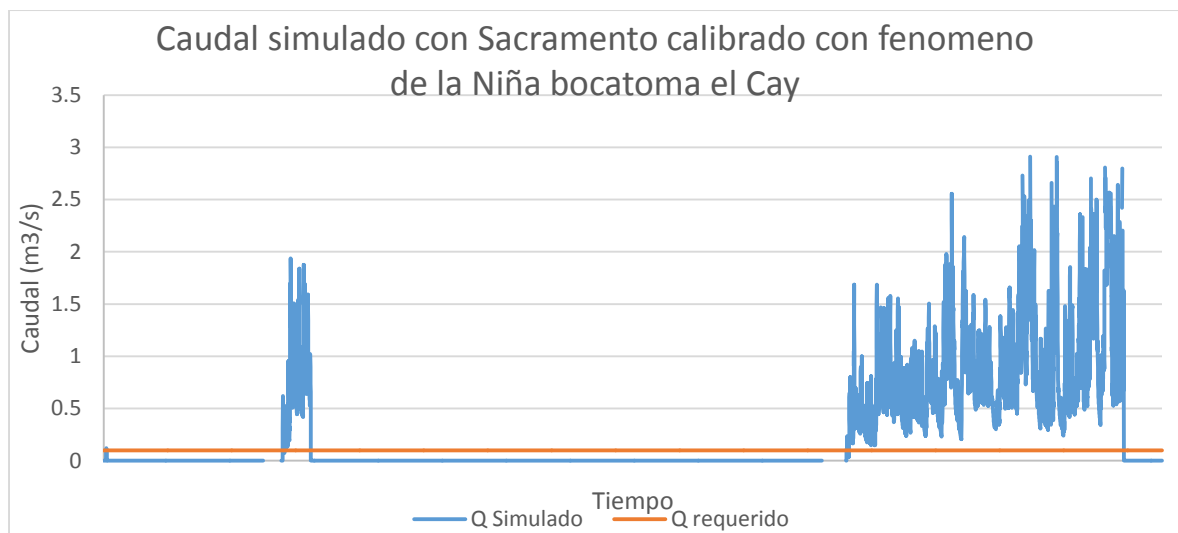
Fuente: Propia

El periodo de simulación se realiza entre el 1 de enero de 1983 hasta el 23 de octubre de 2012, hay intermitencias en el registro de precipitación, sin embargo es posible simular el recurso hídrico con este problema sin considerar estos periodos (no hay registro en el 01/07/1987 – 31/12/1987 y 01/04/2003 – 30/11/2003). Los resultados de simulación no son muy alentadores como lo muestra la Grafica 62 solo en el fenómeno del Niño, los resultados se pueden interpretar como insuficiente precipitación para formar escorrentía en un canal con resultados dudosos al final del periodo, pero la vista técnica demuestran lo contrario tal lo mostrado en las Ilustración 57 e Ilustración 59 al tener abundante agua. Igualmente una estación limnimetrica ubicada en medio de las bocatoma antigua y nueva el Cay llamada Bocatoma de código 21217250 muestra lo contrario, en ella se denota un caudal suficiente para su recolección. Antes de pasar a esta estación se modela con el modelo AWBM, calibrado en fenómeno del Niño obteniendo una simulación con escorrentía suficiente para su recolección y poco déficit del agua que necesita el punto de recolección. Retomando la estación Bocatoma, esta al comparar con los



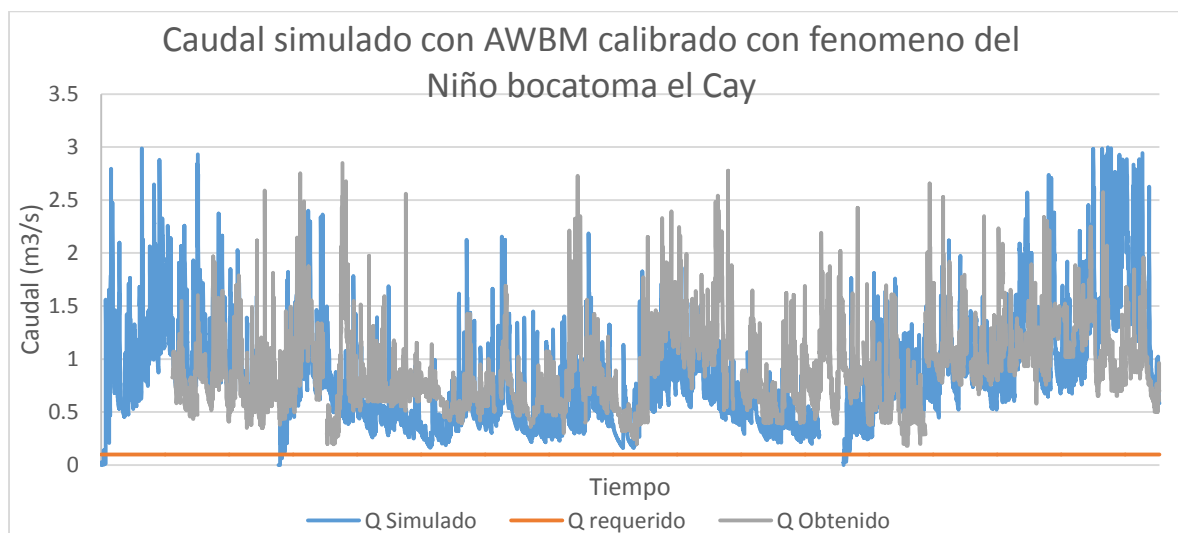
datos simulados por AWBM (Grafica 63) esta aparenta estar sub estimada en algunos tramos, esto se confirma en la curva de duración en la Grafica 64 comparando los datos calculados con la estación, el ajuste aunque no es perfecto es muy bueno. De esto se puede deducir que no solamente se debe basar en un modelo para definir si es posible la extracción del recurso hídrico, con el fin de tener distintos puntos de referencia que abarquen la mayor cantidad de posibles situaciones.

Grafica 62 Caudal simulado en bocatoma el Cay con Sacramento calibrado con fenómeno de la Niña



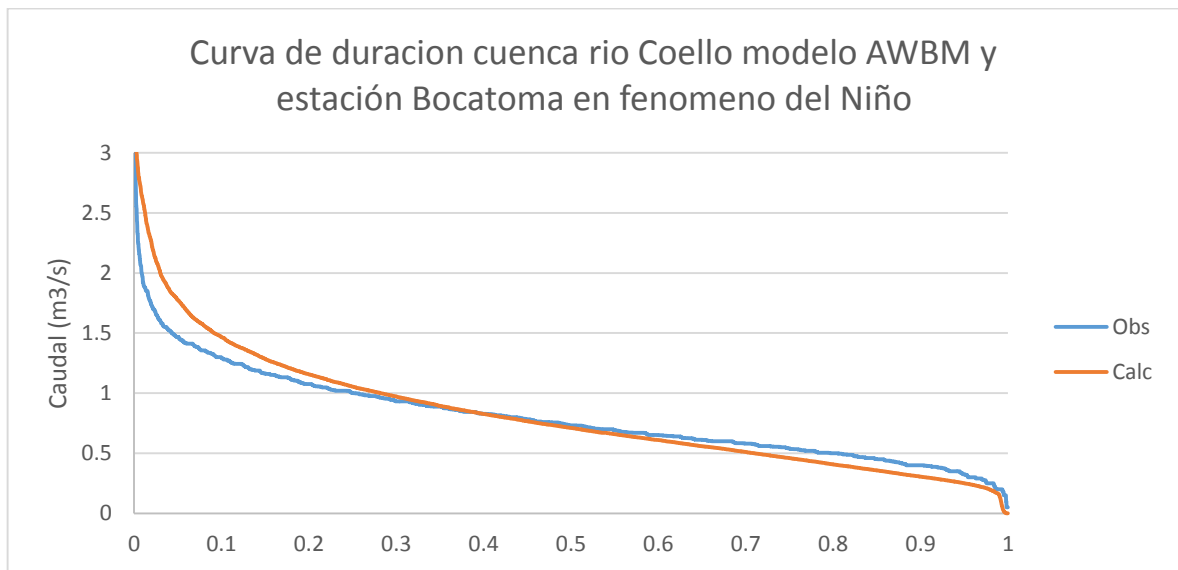
Fuente: Propia

Grafica 63 Caudal simulado en bocatoma el Cay con AWBM calibrado con fenómeno del Niño



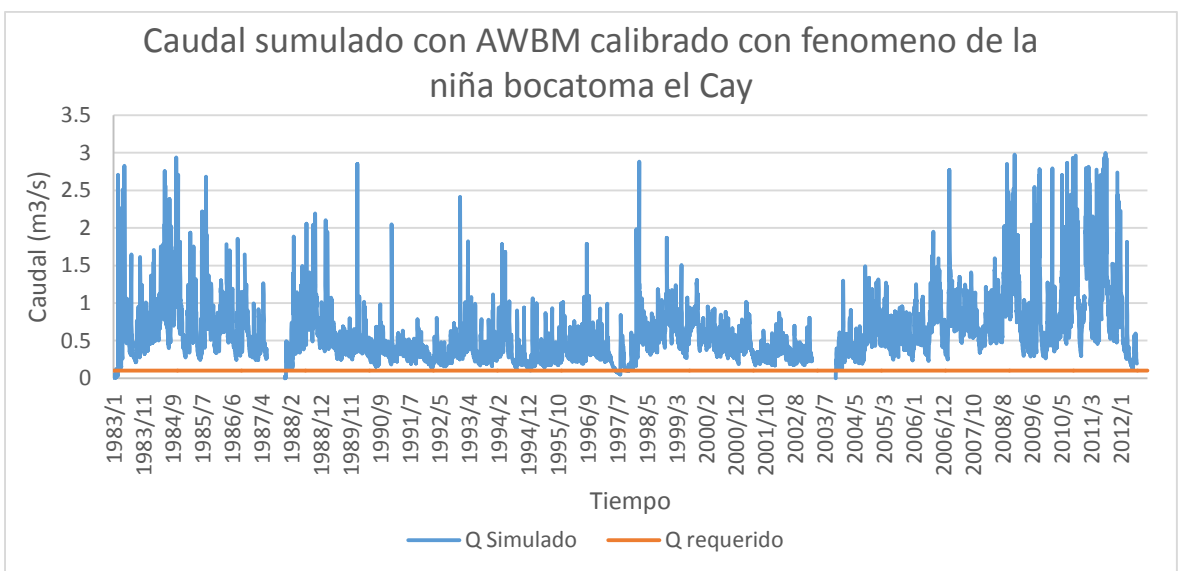
Fuente: Propia

Grafica 64 Curva de duración cuenca rio Coello modelo AWBM en fenomeno del Niño, aplicada a la estación Bocatoma



Fuente: Propia

Grafica 65 Caudal simulado en bocatoma el Cay con AWBM calibrado con fenómeno de la Niña



Fuente: Propia

Las afectaciones que tendría el punto de captación según lo dado por el modelo AWBM sería en las fechas de 30/01/1988 – 04/02/1988 y 01/12/2003 – 30/12/2003

sin tener en cuenta el caudal ecológico. Mientras que según la Grafica 65 los caudales más altos están alrededor de los  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  alrededor de los años 1983, 1984, 1998, 2008 – 2012, sin embargo es necesario tener en cuenta el caudal de diseño de la bocatoma nueva para evaluar su riesgo.

### 5.1.2.3 Bocatoma Combeima

#### 5.1.2.3.1 Ubicación y características

El punto está entre las veredas tres esquinas y La María en atribución a Ibagué en latitud  $4^{\circ} 29' 00''$  y longitud  $75^{\circ} 17' 08''$ , esta bocatoma fue recientemente remodelada, por tanto sus instalaciones se encuentran en buen estado. Esta consta de rejillas laterales y de fondo adecuados tal se observa en la Ilustración 62 y en Ilustración 63 aunque poco visible se encuentra allí. Dentro del área destinada a la bocatoma se encuentran el desarenador compuesto por 4 cámaras (Ilustración 64) en el cual se lleva por tubería hasta la planta de tratamiento de agua potable la Pola. Aunque según la resolución 324 de 1999 se considera “que mediante resolución 578 del 29 de julio de 1969 [...] otorgando, entre otras, concesión de aguas [...] del acueducto urbano de Ibagué, para un total de  $1000 \text{ l/s}$ . [...] La población urbana de Ibagué ha crecido de manera considerable [...] es de imperiosa necesidad replantear la distribución de caudales de río Combeima, con el ánimo de dotar con suficiente caudal el acueducto urbano” y resuelve en el artículo segundo “otorgar al Instituto Ibaguereño de Acueducto y Alcantarillado IBAL aumento de la concesión de aguas del río Combeima la cantidad de  $860 \text{ l/s}$ , para beneficio del acueducto municipal de la ciudad de Ibagué” (Corporación Autónoma Regional del Tolima 1999a). Acorde a lo anterior el caudal total concesionado es de  $1.86 \text{ m}^3/\text{s}$ , pero según los administradores de la bocatoma, el caudal que se toma es de  $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$  y es la mayor fuente de captación de la ciudad. Esta bocatoma según los encargados, cuenta con serios problemas, en épocas invernales la turbiedad del agua es tan alta que es imposible tratarla y se presentan suspensiones del servicio en la ciudad.

Ilustración 62 Rejilla lateral Bocatoma Combeima



Fuente: Propia

Ilustración 63 Rejilla de fondo Bocatoma Combeima



Fuente: Propia



#### Ilustración 64 Desarenadores Bocatoma Combeima



Fuente: Propia

#### 5.1.2.3.2 Simulación y análisis de resultados

El parteaguas se delimita por el pico más alto del nevado del Tolima, es así que cierta parte del recurso hídrico es proveniente de este sitio, tal se ve en la Ilustración 65. Esta cuenca tiene un área de  $166.5 \text{ km}^2$ , la bocatoma se encuentra al lado de la vía en camino al nevado del Tolima. Las estaciones pluviométricas utilizadas en la simulación fueron:

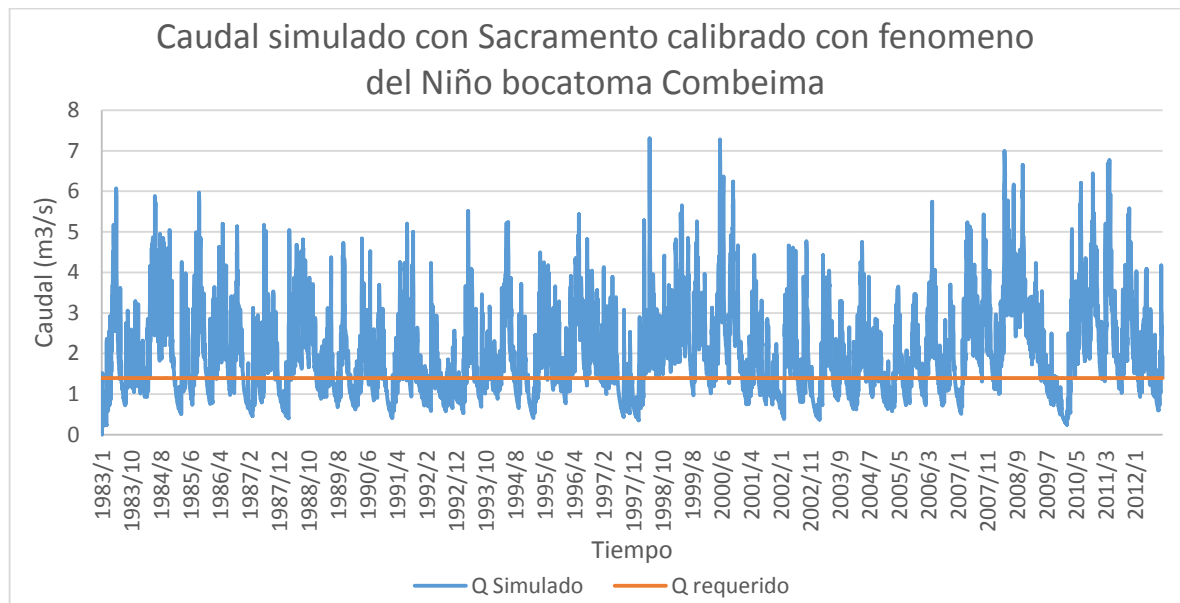
- Esmeralda La [21210120]
- Juntas Las [21210020]
- Palmar El [21210220]
- Pastales [21210030]
- Placer El [ 21210110]
- Rancho El [21210100]
- Secreto El [21210080]
- Silencio El [21210260]

Y las estaciones climáticas fueron:

- Cajamarca [21215100]
- Perales Hato Opia [21245010]
- Sta Isabel [21255110]

El periodo de simulación abarca desde el 1 de enero de 1983 hasta el 23 de octubre de 2012. Al valerse de la simulación del modelo Sacramento calibrado con fenómeno del niño (Grafica 66) se distingue que la escorrentía obtenida en ocasiones es menor a la captada. Una razón por lo que sucede es que cierta parte del parteaguas de la cuenca pertenece al nevado del Tolima, y el deshielo de este no se tiene en cuenta por falta de información, adicionando que el modelo no tiene en cuenta el caudal bases. A pesar de que el modelo Sacramento ha resultado ser bueno en condiciones donde es común nevar como lo es los Estados Unidos (National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA 2002), en estos sitios cuentan con mediciones de milímetros de nieve y son útiles en la calibración del modelo. Mientras que en el nevado del Tolima no se hacen este tipo de mediciones, actualmente existe una estación automática cerca al nevado (Ver Ilustración 15 y Tabla 3), pero dichos datos no fueron suministrados.

Grafica 66 Caudal simulado en bocatoma Combeima con Sacramento calibrado con fenómeno del Niño



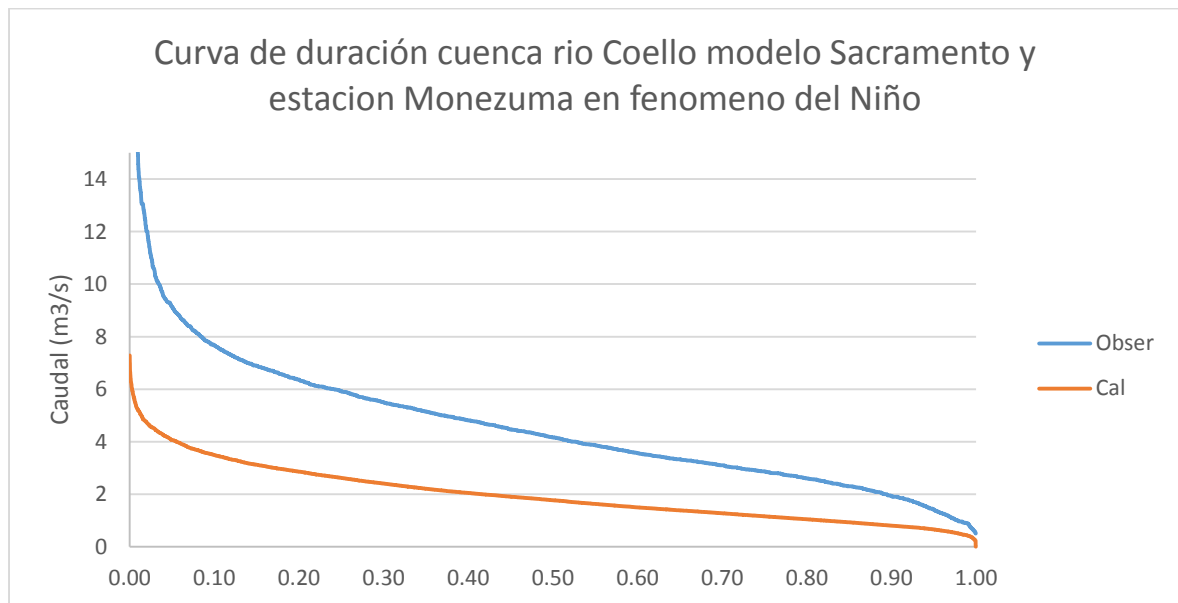
Fuente: Propia

Por otra parte se puede destacar al ejecutar el modelo calibrado en fenómeno de la Niña (Grafica 68) esta ubicación no es muy viable la bocatoma en este punto, pero contrario a esto, en la estación Montezuma de código 21217180 que se encuentra a menos de 100 metros aguas abajo de la bocatoma muestra lo contrario, el caudal es suficiente para el suministro continuo de agua, una de las razones es la curva de duración entre los datos de esta estación y los datos calculados (Grafica 67) toda la curva de duración de datos calculados esta sub estimada, por consiguiente no es muy válido lo calculado por el modelo Sacramento en fenómenos del Niño.

Por lógicas razones al aplicar el modelo calibrado en fenómenos de la Niña la escorrentía es mayor (Grafica 68), por tanto la falta del recurso hídrico es casi nula. La principal razón de esto es igual que lo aplicado en el fenómeno del niño, en la Grafica 69 se nota la similitud de la información recolectada con la simulada, a pesar de no mostrar los caudales más altos, se recorta la gráfica para facilitar su lectura.



Grafica 67 Curva de duración cuenca rio Coello en fenomeno del Niño, aplicada a la estación Montezuma

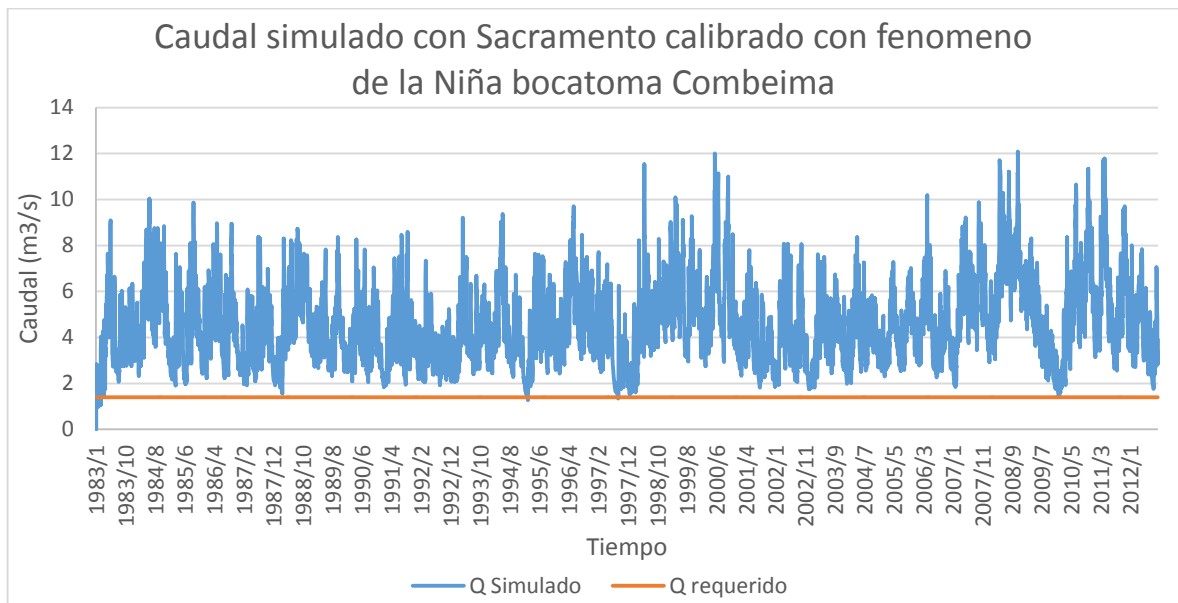


Fuente: Propia

Al aparentar su similitud se calcula el NSE entre el caudal calculado y el observado, y este es de 0.121, aparentemente no puede ser un buen resultado, pero se denota lo aproximado que el modelo es capaz de simular los caudales en la zona. Por ende, es necesario una lectura en campo para corroborar que los datos simulados verdaderamente identifican la zona de cierre de la cuenca, e identificar con qué tipo de fenómeno climático se caracteriza la cuenca, esto puede ser aplicados a zonas con climas extremos, como el nevado del Tolima donde su información tanto climática como de nieve es desconocida.

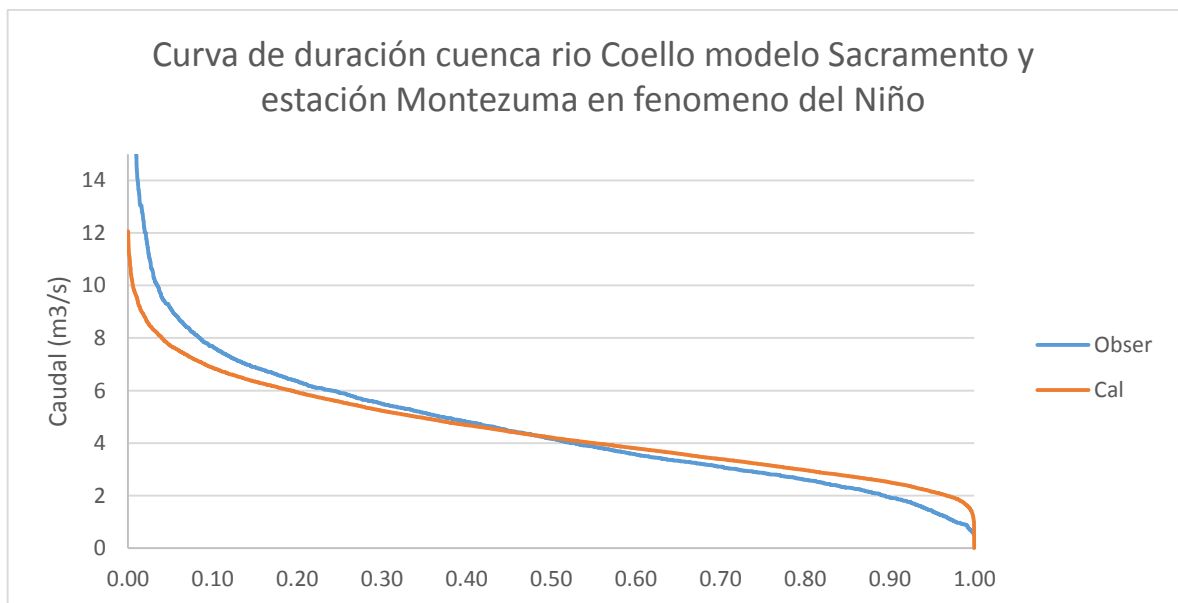
En cuanto a la afectación encontrada por el modelo, se encuentra que las fechas de 10/02/1995 – 16/02/1995 y 26/08/1997 – 29/10/1997 el caudal es insuficiente. Según lo expresado por los administradores de la bocatoma, esta cuenta un problema no de déficit de agua si no de exceso de agua, causando una alta turbulencia llevando una carga de sedimentos bastante alta que impide ser limpiada con la infraestructura de la Planta de Tratamiento de Agua Potable existente. Mientras tanto para determinar si la estructura existente de recolección de aguas al ser de fondo y lateral, es necesario un estudio hidráulico del canal para encontrar si la cota máxima lograda por los caudales más altos tomados por la estación puede afectar o no dicha estructura.

Grafica 68 Caudal simulado en bocatoma Combeima con Sacramento calibrado con fenómeno de la Niña



Fuente: Propia

Grafica 69 Curva de duración cuenca rio Coello modelo Sacramento en fenomeno del Niño, aplicada a la estación Montezuma



Fuente: Propia

#### 5.1.2.4 Bocatoma rio Cocora

Según la resolución 1095 de 2007, existe actualmente una concesión de aguas en el rio Cocora por 1009 l/s con destino a surtir el acueducto de la ciudad de Ibagué, (Corporación Autónoma Regional del Tolima 2007) pero por problemas con la Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado IBAL no fue posible coordinar la visita a este sitio.

#### 5.1.2.5 Bocatoma Chembe

Argumentan los administradores de las bocatoma que existe en el sector del viaducto del salado una bocatoma utilizado únicamente en caso de emergencia, e igualmente por problemas con la Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado IBAL no fue posible coordinar la visita a este sitio ni existe alguna regulación legal sobre esta bocatoma.

#### 5.1.3 Espinal y Coello

##### 5.1.3.1 Bocatoma distrito de riego USOCOELLO

###### 5.1.3.1.1 Ubicación y características

La bocatoma se encuentra en el sector de Gualanday en el municipio de San Luis, en las coordenadas latitud 4° 16' 45" y longitud 75° 01' 43". Esta bocatoma construida en el año de 1950 y puesta en servicio en 1953, es la que actualmente aún se emplea. Según la Resolución 473 de 2006 se resuelve en el artículo primero que "Conceder a la Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de los Ríos Coello y Cucuana USOCOELLO [...] la concesión de aguas otorgada mediante la resolución número 0175 del 24 de enero de 1996, del rio Coello, en cantidad de  $9.64 \text{ m}^3/\text{s}$ ", además de consignar "como sobre la infraestructura de captación y conducción se encuentran incluidos los acueductos de los municipios de Espinal y Coello que requieren de un caudal de 974 y 78 l/s respectivamente" (Corporación Autónoma Regional del Tolima 2006), dado por entendido que de esta bocatoma se reparte el agua a estos municipios. Para la toma de agua se desvía el cauce natural del rio y pasa por un canal (Ilustración 66), en la parte lateral se encuentra la bocatoma, se ve en la Ilustración 67 y se detalla el estado de la misma, el cual es bueno, donde el caudal es controlado por una pantalla hidráulica. El vertedero de excesos se encuentra al final del canal e igualmente es controlado por una pantalla, se observa en la Ilustración 68 compuesto por dos compuertas y en la Ilustración 69 el canal de transporte que funciona a la vez de desarenador, pero este se encuentra superado por los sedimentos que llegan, por lo que hay dispuesto maquinaria para la remoción del material. No todo el cauce natural del rio es obligado a pasar por este punto, justo al frente de esta infraestructura se encuentra el cauce del rio alterado con una rejilla de fondo, la cual no estaba en funcionamiento en la fecha de la visita (Ilustración 70), por lo tanto el agua podía atravesar la estructura sin problema alguno. Posterior a esto es llevado por canal donde luego

se deriva para los acueductos de Espinal y Coello, el restante es llevado hasta los distintos beneficiarios de USOCOELLO para cultivos.

Ilustración 66 Canal de desviación del cauce



Fuente: Propia

Ilustración 67 Bocatoma USOCOELLO



Fuente: Propia

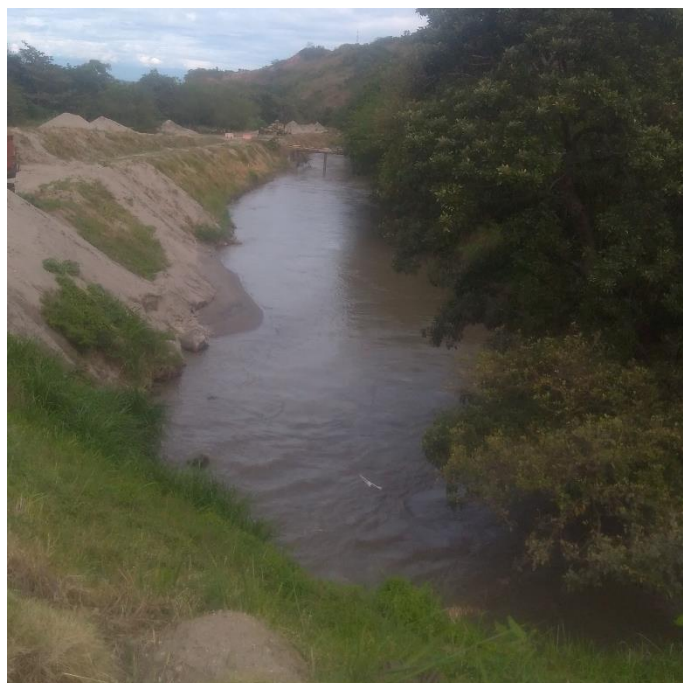


Ilustración 68 Vertedero de excesos bocatoma USOCOELLO



Fuente: propia

Ilustración 69 Desarenador Bocatoma USOCOELLO



Fuente: Propia

Ilustración 70 Cauce del rio Coello en bocatoma de USOCOELLO



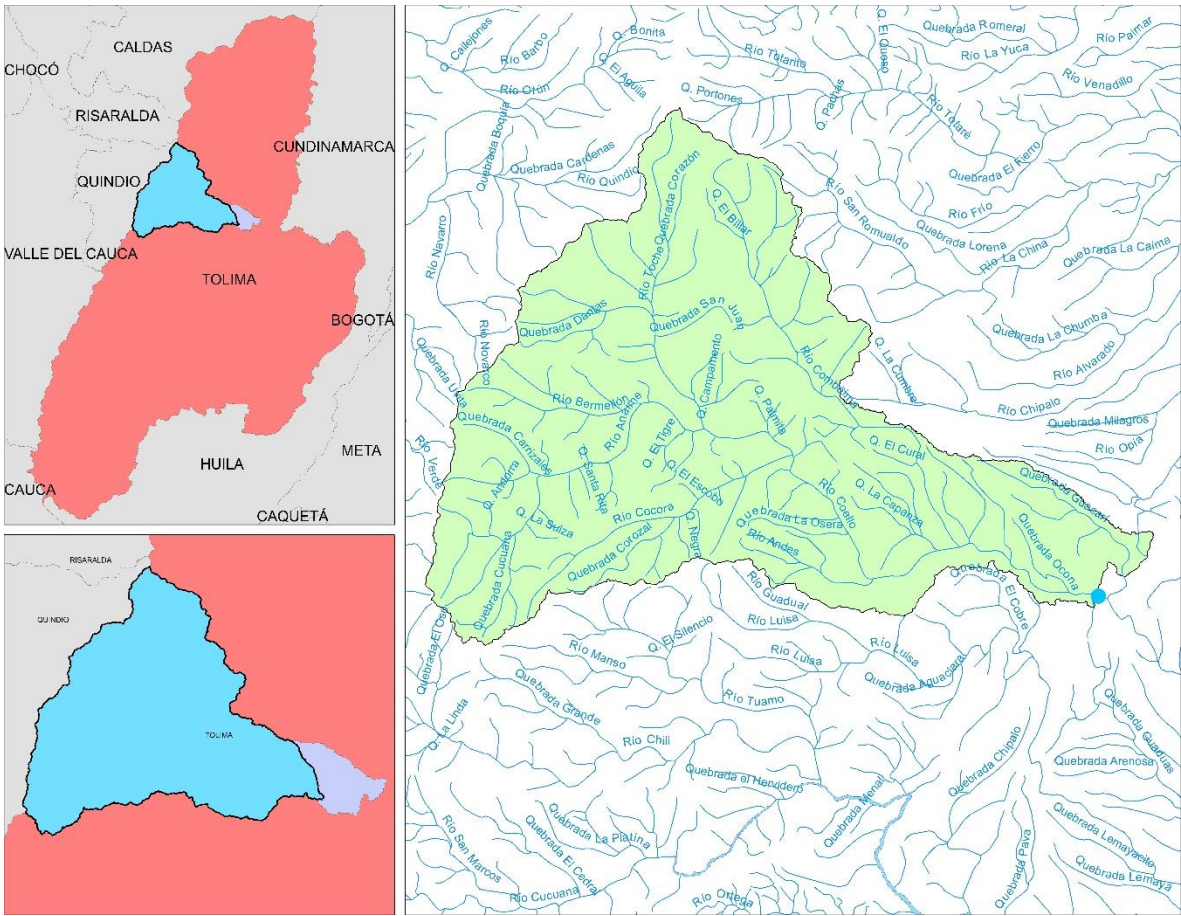
Fuente: Propia

#### 5.1.3.1.2 Simulación y análisis de resultados

La cuenca generada es más grande en comparación a la que se manipuló para la calibración de los modelos, el área de esta es de  $1650.7 \text{ km}^2$  y la comparación con la cuenca delimitada para la calibración de los modelos se indica en la Ilustración 71 en la parte inferior izquierda, para las características climáticas se usan todas las estaciones tomadas para la caracterización climática en la calibración, sumada la estación Chicoral código 21215080 para el cálculo de ETo en la parte mas baja de la cuenca.



Ilustración 71 Cuenca Bocatoma USOCOELLO - Espinal



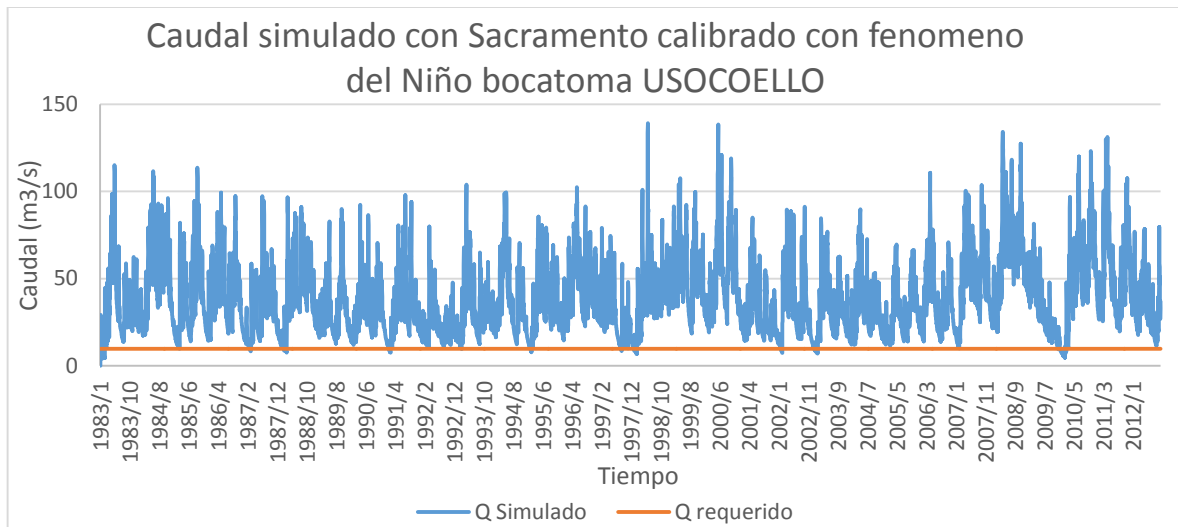
Fuente: Propia

El periodo de simulación esta entre el 1 de enero de 1983 hasta el 23 de octubre del 2012. Esta se ve afectada primordialmente en los meses de enero, febrero y marzo (Grafica 70) específicamente en las fechas 20/03/1987 – 28/03/1987, 01/03/1988 – 30/03/1988, 12/02/1991 – 03/03/1991, 04/02/1995 – 17/02/1995, 22/08/1997 – 31/08/1997, 30/12/1997 – 02/02/1998, 20/02/2002 – 07/03/2002, 30/01/2003 – 06/03/2003, 29/12/2009 – 01/03/2010. Aunque los caudales destinados a las poblaciones civiles no son afectados en los meses más secos, la distribución a los distritos de riego si lo es, para poder preservar el caudal ecológico del río.

A pesar de ser una infraestructura tan antigua, el mantenimiento es bueno, la intervención en el río es amplio y posiblemente puede soportar los altos caudales previstos en la Gráfica 71, sin embargo es carácter de una modelación hidráulica en la estructura afectada para determinar si se ve afectado en los caudales que

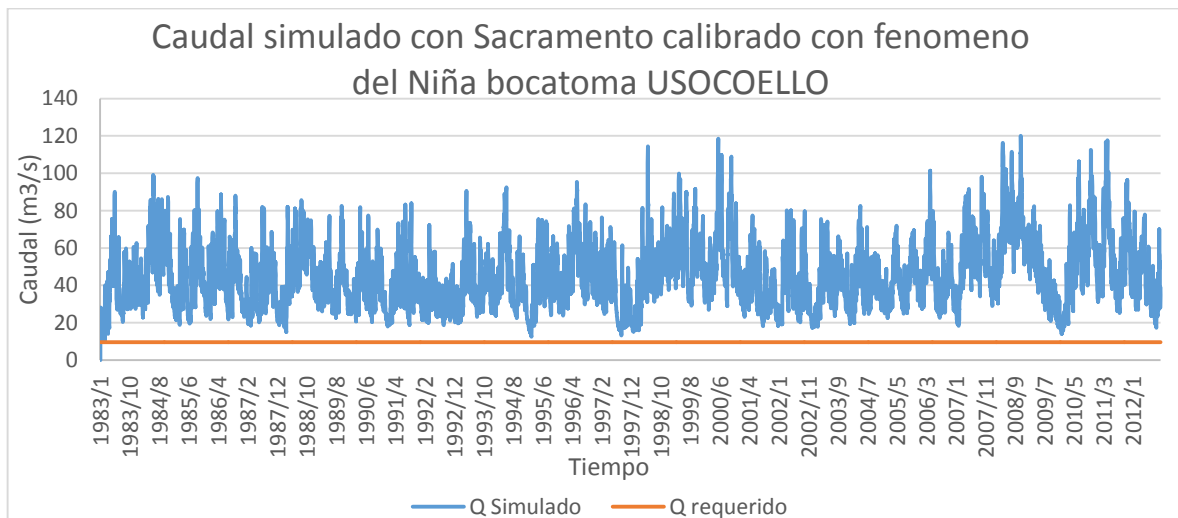
llegan a ser de hasta  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  a lo largo de todo el periodo de registro. Con mayor intensidad en los años de 2010 – 2012, los cuales son más recientes.

Grafica 70 Caudal simulado en bocatoma USOCOELLO con Sacramento calibrado con fenómeno del Niño



Fuente: Propia

Grafica 71 Caudal simulado en bocatoma USOCOELLO con Sacramento calibrado con fenómeno de la Niña

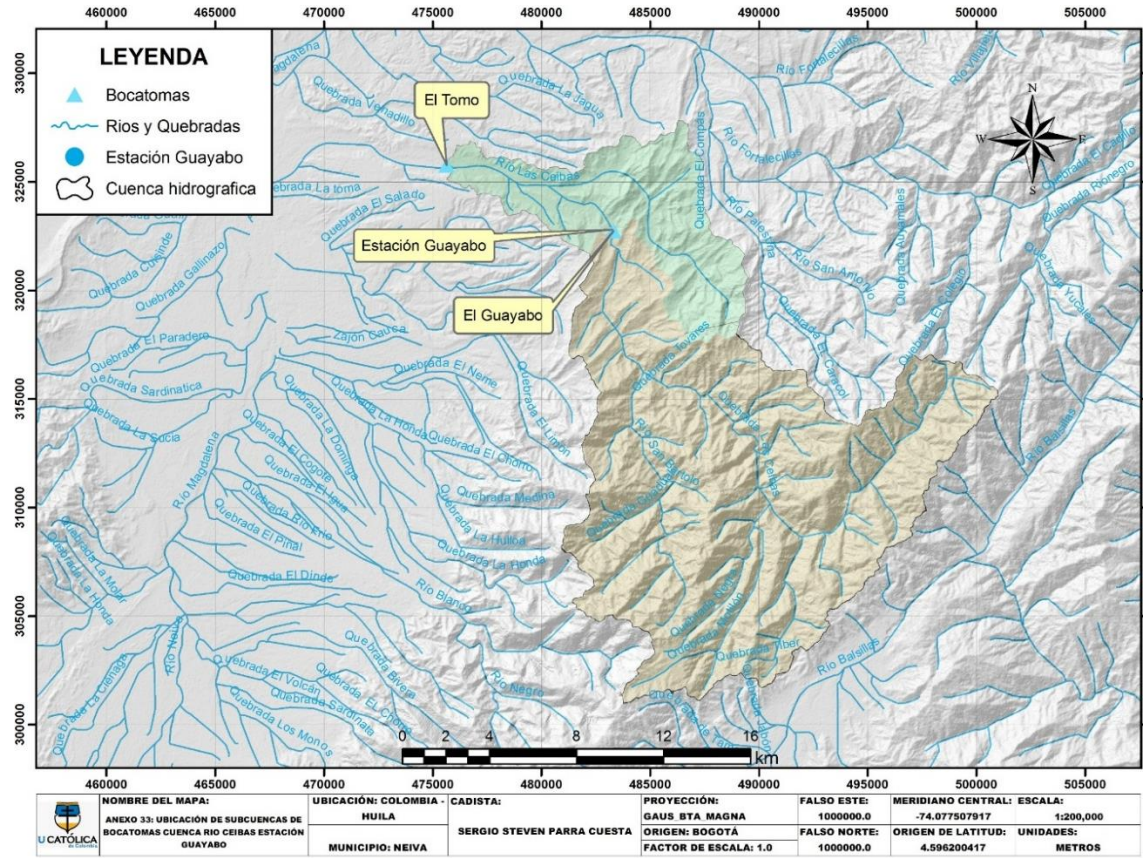


Fuente: Propia

5.2 Cuenca del rio las Ceibas

Para esta cuenca se apropia el modelo AWBM pero solamente evaluando en fenómenos normales del clima, por tanto es posible adquirir el caudal medio que produce en cualquier punto de la cuenca. La ubicación de las cuencas se puede ilustrar en la Ilustración 72, y en la Tabla 14 se resumen la ubicación de las captaciones de agua en el sistema de coordenadas GAUSS MAGNA origen Bogotá y el caudal captado por cada una de ellas.

Ilustración 72 Mapa de ubicación de puntos de captación de agua en la cuenca del rio las Ceibas



Fuente: Propia

Tabla 14 Ubicación bocatomas sobre la cuenca del rio Ceibas

Bocatoma	Municipio	Caudal ( $\frac{m^3}{s}$ )	Empresa	Altitud	E	N
El Tomo	Neiva	0.7	EPN	553	873070.1795	817731.3091
El Guayabo	Neiva	0.8	EPN	696	880744.1307	814685.0767

Fuente: Propia



### 5.2.1 Neiva

Es importante mencionar que dentro de la ciudad se está implementando campañas publicitarias promoviendo el cuidado del agua y la protección de la cuenca del río Ceibas, todo esto impulsado por la CAM, Empresas Públicas de Neiva (EPN) y la alcaldía misma. Igualmente se evidencia la falta de cultura por parte de los pobladores que contaminan los alrededores del río las Ceibas.

#### 5.2.1.1 Bocatoma el Tomo

##### 5.2.1.1.1 Ubicación y características

Ilustración 73 Bocatoma el Tomo



Fuente: Propia

Ubicada en las periferias de Neiva con latitud  $2^{\circ} 56' 50''$  y longitud  $75^{\circ} 13' 09''$ , esta bocatoma es de las más antiguas existentes en la ciudad y surte de agua a esta desde mediados del siglo pasado. Según la resolución 97 de 2012 expedida por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena CAM, esta bocatoma cuenta con una concesión de aguas de 700 l/s en la cual entra por una bocatoma lateral como se observa en la Ilustración 73 y cuenta con un buen estado, la entrada de agua se encuentra regulada por una compuerta manual la cual se observa en la

parte de atrás de la rejilla. Para que el agua entre en la bocatoma, esta cuenta con una presa que acumula el agua como se muestra en la Ilustración 74, alcanzando la cota deseada, el agua es canalizada hasta tres tanques de desarenadores dada la Ilustración 75 y luego es llevada por tubería hasta las plantas de tratamiento de agua potable el Recreo y Kennedy en la ciudad de Neiva.

Ilustración 74 Presa Bocatoma el Tomo



Fuente: Propia

Ilustración 75 Desarenadores Bocatoma el Tomo



Fuente: Propia

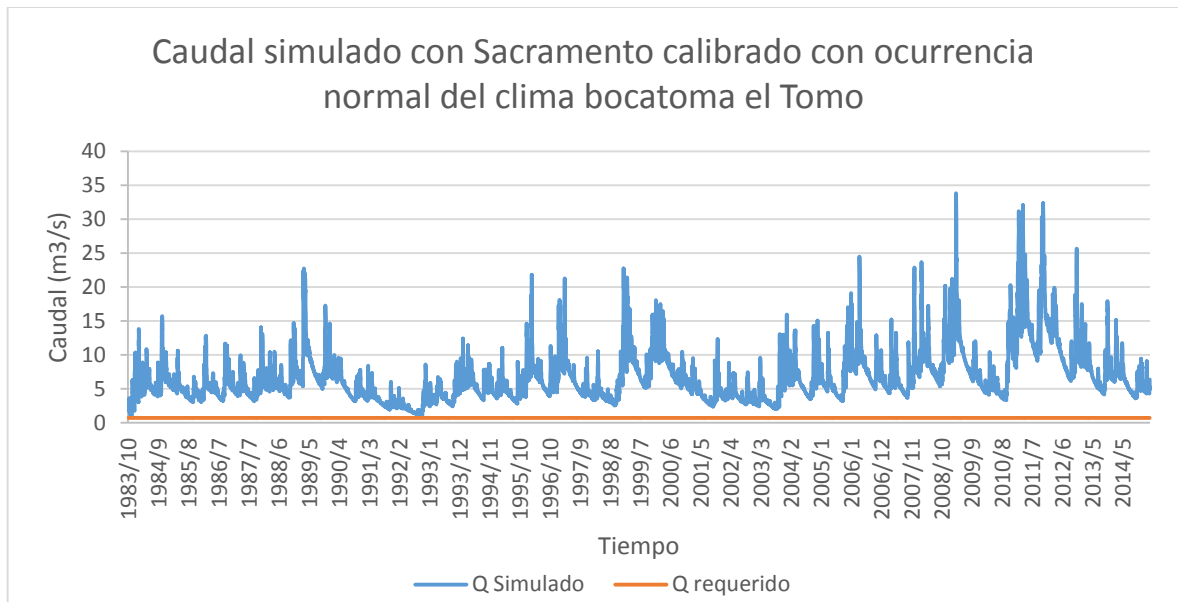






Dado lo anterior no es posible afirmar que esta captación no sufra por déficit de agua, la calibración en ocurrencia normal del clima se puede hallar el caudal medio que produce la cuenca el cual es de  $6.59 \text{ m}^3/\text{s}$ , pero no caracteriza el comportamiento hidrológico de la cuenca en fenómenos de sequía, cuando el agua suele escasear. Para ello es de estudio la aplicación de otros modelos que se ajusten mejor a la cuenca en la calibración de fenómenos del Niño y su impacto en el recurso hídrico.

Grafica 72 Caudal simulado en bocatoma el Tomo con Sacramento calibrado con ocurrencia normal del clima



Fuente: Propia

En relación con los caudales más altos, debido al buen ajuste de la curva de duración en los caudales más altos mostrada en el título 4.2.2.6, los caudales simulados pueden servir de referencia en el diseño de alguna estructura hidráulica en el futuro. Los caudales más altos abarcan los  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ , los cuales se produjeron en 27/03/2009 – 29/03/2009, 25/02/2011 – 02/03/2011, 13/02/2011 – 17/02/2011, 14/11/2011 – 01/12/2011 y 07/12/2012, los cuales corresponden a periodos más actuales. Esto último es riesgoso porque cerca de la bocatoma el Tomo se encuentran viviendas aledañas, con un estudio hidráulico del río y los caudales más altos obtenidos en este estudio se puede determinar la afectación por posible inundación en esta zona, la delimitación de la cuenca en esta zona presenta un encausamiento de la cuenca, lo que puede concentrar el producto de una torrencial lluvia y afectar esta población o la misma infraestructura.

### 5.2.1.2 Bocatoma el Guayabo

#### 5.2.1.2.1 Ubicación y características

Esta se encuentra situada en la vía hacia San Vicente del Caguan, a 8 kilómetros de la ciudad de Neiva, en latitud  $2^{\circ} 55' 11''$  y longitud  $75^{\circ} 09' 00''$ , esta fue construida y puesta en servicio en el año de 1998 con un caudal de 470 l/s pero según la resolución 97 de 2012 expedida por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena CAM el caudal concesionado es de 800 l/s y es aproximadamente la actual. Por consecuencia de una creciente del río, fue dañado severamente la bocatoma a tal punto que se debió reconstruir, consecuencias de esta crecida se observa en la Ilustración 77, en la parte de abajo está una placa que no pudo ser removida y esta era parte de un perfil controlado para la entrada lateral de agua, sin embargo la bocatoma fue reconstruida en el mismo sitio. En la Ilustración 78 está la bocatoma actualmente en funcionamiento, para la entrada del agua se modificó el cauce natural del río para que en épocas de sequía el agua pase por un canal artificial de 4 metros e ingrese a las rejillas laterales, luego de esto se controla el caudal de entrada con compuertas manuales y por tubería es llevada a tres tanques de desarenadores (Ilustración 79), a continuación se lleva por tubería hasta un reservorio (Ilustración 80) donde según los administradores de la planta de tratamiento de agua potable El Jardín, cuenta con una reserva para la ciudad de 3 a 5 días. Una vez se almacena es llevada por tubería hasta la planta de tratamiento de agua potable El Jardín.

Ilustración 77 Residuos Bocatoma el Guayabo



Fuente: Propia



Ilustración 78 Bocatoma el Guayabo



Fuente: Propia

Ilustración 79 Desarenadores Bocatoma el Guayabo



Fuente: Propia

### Ilustración 80 Reservorio Pondaje



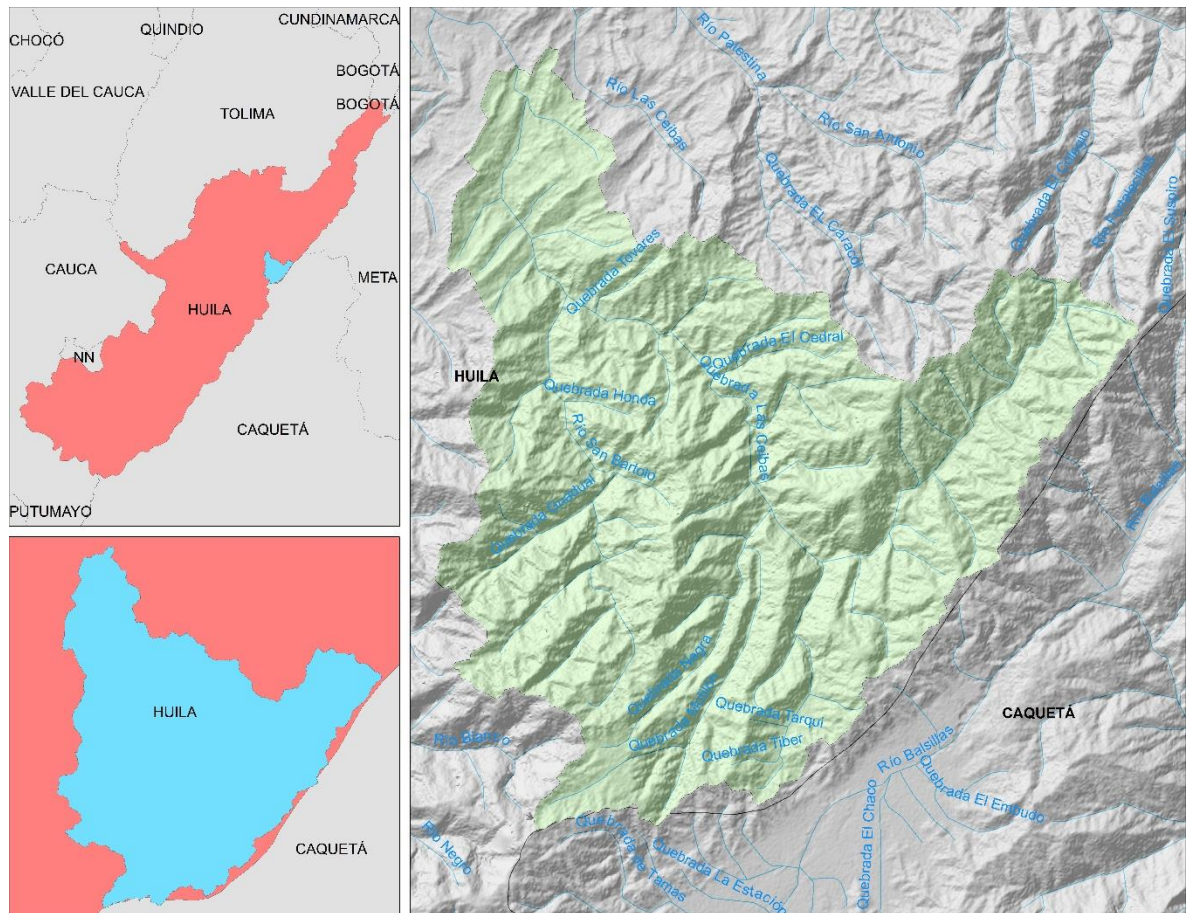
Fuente: Propia

#### 5.2.1.2.2 Simulación y análisis de resultados

El punto de captación se encuentra a menos de 50 metros de la estación limnimétrica el Guayabo que se manejó para la calibración del modelo, el área aferente de la cuenca no varía demasiado, ya que el área de la cuenca de la bocatoma es de  $224.12 \text{ km}^2$ , en cambio la cuenca de la estación es de  $224.24 \text{ km}^2$  y la diferencia de estas es de apenas  $0.12 \text{ km}^2$ , esta diferencia no es tan marcada y la producción de esorrentía sería casi que la misma a la obtenida en la estación. La delimitación por ende es casi igual a la utilizada en la calibración, sin embargo esta se muestra en la Ilustración 81.



**Ilustración 81 Cuenca Bocatoma el Guayabo - Neiva**



Fuente: Propia

## 6. Conclusiones

- Se identifican las distintas características propuestas de las cuencas, dando por hecho una importante diferencia tanto de la disponibilidad de la información, la calidad y la cantidad de información, diferencias topográficas, geométricas, ambientales e hídricas, de esta manera se pudo evaluar cómo se adaptaron los modelos a ambas cuencas, con resultados distintos una de la otra, dando una perspectiva de en qué cuencas es posible usar los modelos.
- La aplicación de los modelos aunque no fue satisfactorio en la cuenca del río las Ceibas, fue posible, arrojando resultados que pueden ser usados tanto para las corporaciones autónomas en la toma de decisiones, como por investigadores que indaguen la adaptación de los modelos en otras partes del país.
- Las bocatomas estudiadas cuentan con una baja vulnerabilidad a periodos prolongados de poco recurso hídrico, con mayor tiempo la bocatoma Choros Blancos en Cajamarca por casi 3 meses, sin embargo el desabastecimiento es poco probable debido a que tiene la bocatoma Dos Quebradas y es posible tomar agua de ambos sitios para suplir las necesidades de la comunidad.
- Para la cuenca del río Coello el modelo que mejor comportamiento tiene es Sacramento, evaluando la adaptación a eventos climáticos. Considerando el fenómeno del Niño, se obtiene un NSE de 0.366 en la calibración con un resultado similar en la validación de 0.333. Esta decisión no se nota solo por su NSE, la curva de duración para el fenómeno del Niño calcula el caudal resultante muy cerca a la observada, y sub estima en los valores más bajos observados en la cuenca, al evaluar el fenómeno climático clave en la asignación de concesiones de agua (Podger 2004) por parte de la corporación autónoma regional no cabe duda en tomar el que mejor considere la escorrentía mínima en la curva de duración de cada modelo.
- El modelo AWBM apropiado en la cuenca del río Coello no se generaron resultados que dudara de su adaptación, de hecho el NSE para calibración y validación son 0.350 y 0.314 respectivamente en fenómeno del Niño. Pero comparando con Sacramento, AWBM tiende a sobre estimar los caudales más bajos, y a la hora de la evaluación de obras de captación podría presentar un problema de desabastecimiento no considerado.
- El modelo Sacramento puede hacer uso para estimar el caudal medio en épocas de altas precipitaciones, pero no es recomendable para estimar caudales pico en ciertos puntos de la cuenca puesto que el modelo subestima alrededor del 20% de los caudales más altos.
- Aparentemente calcular el caudal medio de la cuenca no es muy apropiado ninguno de los modelos, con fenómenos normales del clima, la calibración NSE de ambos modelos es satisfactoria, la validación se encuentra por debajo de 0, este resultado puede implicar dos puntos. El primero es la falta



de adaptabilidad a datos más recientes de la cuenca, esto conlleva al segundo y es un cambio en las características del suelo durante el tiempo en ocurrencias que no involucren eventos extremos.

- Los resultados en la transición de fenómenos climáticos indica que se puede tener un control en el transcurso entre estos, su adaptación en la curva de duración tanto en la escorrentía más baja como en la más alta se podría estimar un caudal para uso de recuperación de fenómenos del Niño, con ello estimar el flujo con el que posiblemente se podría suplir demandas luego de ocurrencias del fenómeno del Niño.
- En la cuenca del río Ceibas el modelo mejor adaptado es AWBM, pero calibrado en fenómenos normales del clima con NSE de calibración y validación de 0.373 y 0.410 cada uno. Por esta razón es útil el modelo para calcular el caudal medio del cauce en cualquier punto de la cuenca.
- Una posible justificación de la cual no se pueda calibrar muy bien los otros periodos es el tamaño de la cuenca, al ser de un tamaño de  $224 \text{ km}^2$  la escorrentía llega al punto de cierre rápidamente, es decir que se necesitaría un registro frecuente del caudal durante el día para estimar un caudal medio, esta estación es ordinaria y por tanto las mediciones se toma las 7:00 am.
- Los modelos al no considerar el caudal base o el agua que llega o sale de la cuenca por medio subterráneo varia el comportamiento de la cuenca para la administración del agua a través del suelo, inclusive puede haber agua no registrada por la estación que pasa por el subsuelo, por ende no fue considerada en la calibración del modelo.
- En la visita técnica en la cuenca del río Ceibas se informó del crecimiento que ha tenido la ciudad de Neiva en los últimos años. De lo anterior se deduce que por los cambios de uso del suelo es otra causa de que los modelos calibrados en distintos periodos no tienen un ajuste adecuado. La calibración se concreta en los años inferiores al milenio, cuando la ciudad aun es pequeña, pero la validación es hecha después del 2005, cuando el crecimiento de la ciudad es mayor y por ende es necesaria mayor producción de alimentos. Como resultado de lo anterior, un cambio drástico del uso del suelo, también parámetros climáticos en la cuenca y alrededores reaccionando al crecimiento económico de la cuenca. Infiere entonces directamente a los datos de caudal recolectados dedicado a la validación, los modelos al ser calibrados en estos periodos y validados con un cambio del uso del suelo se generaron datos negativos de NSE.
- La actividad económica de la cuenca del río Coello ha sido casi que constante durante los últimos 60 años, esto se evidencia en la creación de la bocatoma del actual USOCOELLO en el año de 1953 en la parte baja de la cuenca, también por la construcción de la vía que comunica al Occidente del país, facilitando a agricultores el transporte de mercancía a todo el país alterando el uso del suelo en la parte alta de la cuenca. Por la razón anterior se puede afirmar los buenos NSE alcanzados en esta cuenca, la escorrentía en toda

la cuenca permanece casi que constante durante los periodos de calibración y validación.

- Aparentemente con lo obtenido en este trabajo, los modelos pueden funcionar mejor en cuencas grandes, por dos grandes razones: la disponibilidad de información, y la mayoría de estaciones limnimétricas disponibles en Colombia son principales, es decir, de medición manual, tomándose a una hora específica por día, en cuencas pequeñas el caudal tomado no representan el caudal medio obtenido en un día, puesto que si se tiene una alta precipitación luego de la toma de la lectura, esta escorrentía puede salir rápidamente de la cuenca, siendo la lectura del otro día poco representativa del día anterior, en cambio una cuenca grande amortigua el caudal representando más el producto de la cuenca. Por ende para modelar en cuencas pequeñas es necesario el registro de caudal con estaciones automáticas. Si se compara con un estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia, donde aplican a la cuenca del río Sumapaz con un área de  $2180 \text{ km}^2$  varios modelos, incluidos los aplicados en este trabajo, se obtienen datos mejores de NSE a los encontrados en estas cuencas usando todos los registros de datos disponibles (Duque et al. 2018), siendo una base para afirmar lo anterior.
- El registro de caudal cercanas a las captaciones en la cuenca del río Coello, aparte de regular el recurso hídrico que pasa por estos importantes sitios se emplearon para comparar los resultados obtenidos por la simulación con datos reales, dejando en contexto la efectividad de la modelación hidrológica en estos puntos y encontrar errores en la simulación. En la cuenca de la bocatoma el Cay al simular con Sacramento en fenómeno climático del Niño, este da que no es posible que se genere escorrentía en el sitio con la precipitación que cae sobre la cuenca, esto cambia al simular con AWBM la cual da resultados más acordes con los observados, con un acercamiento tolerable. La curva de duración de esta es muy cercana a lo observado en todos sus aspectos. De modo que es favorable aplicar más modelos a una cuenca y no basarse en uno solo, con el fin de evitar errores como estos.
- En la bocatoma Combeima el modelo Sacramento da a entender que la escorrentía no es suficiente para ser captada, esto lo desmiente la estación limnimétrica Montezuma situada aguas debajo de la bocatoma. Una justificación de esto es la nula información sobre el nevado del Tolima, tales como información climática y de lámina de nieve caída, a pesar de existir una estación climática automática en nevado, los datos no fueron brindados y por consiguiente no se consideran estos parámetros climáticos, el derretimiento de este nevado aporta agua base la cual no considera el modelo como dato de ingreso al ser difícil su medición, por lo tanto afectando los resultados de la simulación.
- Los modelos no son capaces de estimar el caudal para un día en específico, pero su utilidad abarca en la curva de duración, donde el volumen de agua observado comparado con el calculado es bastante cercana, es posible

usarlo en la estimación del caudal mínimo y medio debido a el acercamiento en la parte baja y media de la curva. Los caudales más altos a pesar de poderse manejar con carácter de estudio, no se recomienda basarse totalmente de los modelos debido a la sub estimación del 20% de los caudales más altos.

## 7. Recomendaciones

- Las bocatoma correspondientes al municipio de Cajamarca presentan poca posibilidad de déficit de agua, la contingencia tomada al construir una bocatoma alterna es favorable para evitar este riesgo. Desde otro punto de vista los diseños de estas estructuras podrían ser de evaluación hidráulica por la posible existencia de caudales altos que dañen esta infraestructura, destaca la bocatoma Chorros Blancos y su distinguible cascada, que pueda sufrir daños graves que impidan la recolección de agua en este punto, sumado a que es la fuente principal de suministro del municipio por abarcar mayor cantidad de agua.
- La simulación en las dos bocatoma de la ciudad de Ibagué aunque demuestren un déficit, esto es innegable por la existencia de las estaciones limnimétricas que demuestren lo erróneo de estos resultados, sin embargo se encontraron similitudes en el volumen de agua calculado con el modelo Sacramento con el fenómeno de la Niña con la estación Montezuma en la bocatoma Combeima, la cual podría ser de utilidad para el cálculo de escorrentía posible pero con los datos de precipitación obtenidos en una línea de tiempo en específica para el cálculo de la escorrentía superficial posible generada. Simultáneamente sucede en la bocatoma el Cay, el volumen de agua calculado por el modelo AWBM en fenómeno del Niño identifica bastante bien los caudales mínimos y máximos de la cuenca.
- A pesar de la gran cantidad de agua que puede llegar a la bocatoma USOCOELLO, en definitiva esta estructura está en capacidad de manejar caudales de hasta  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ , basados en la simulación en este punto, ahora bien pese a esta gran estructura es afectada por efectos del fenómeno del Niño, en los meses de enero y febrero suele ser mayor la afectación, por tanto para mantener un caudal mínimo, el caudal recolectado en este se verá disminuido, afectando a los campesinos aliados a USOCOELLO, pero los acueductos de los municipios de Espinal y Coello no se verán afectados en lo absoluto.
- Es posible mejorar los resultados de NSE obtenidos en este trabajo pero es necesario usar más modelos, además de identificar los parámetros de los modelos.
- El encausamiento de la cuenca del río Ceibas alrededor de la bocatoma el Tomo puede concentrar la escorrentía superficial de la cuenca con posibles consecuencias en la afectación de la infraestructura, hay que añadir que cerca de esta bocatoma se encuentra la periferia de la ciudad de Neiva, pero es de un estudio hidráulico de la zona para constatar el peligro de una posible creciente del río y como afecta a la población.
- A pesar de que ninguno de los modelos se adapta correctamente para evaluar el recurso hídrico en bajas precipitaciones, es de otro estudio buscar el modelo hidrológico que mejor caracterice a la cuenca, con los registros existentes y los resultados arrojados en este estudio es viable aplicar un

modelo cuyos parámetros de humedad del suelo (si aplica para el modelo) cambien durante el tiempo.

## 8. Bibliografía

- ALASKA SATELLITE FACILITY, 2019. About ASF. [en línea]. [Consulta: 16 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.asf.alaska.edu/about/asf/>.
- ALLEN, R., PEREIRA, L., RAES, D. y SMITH, M., 2006. *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de agua de los cultivos*. Roma, Italia: FAO. ISBN 0254-5293.
- AMAYA, G., RESTREPO, C., DAVID, O., VÉLEZ, J. y ÁLVAREZ, O., 2009. Modelación del comportamiento hidrológico de tres cuencas en el Urabá Antioqueño - Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*, vol. 19, pp. 21-38. ISSN 01215701.
- ARCGIS FOR DESKTOP, 2016. Qué es un shapefile. [en línea]. [Consulta: 6 octubre 2019]. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm>.
- ATLASSIAN CONFLUENCE, [sin fecha]. Australian Water Balance Model (AWBM) - SRG. [en línea]. [Consulta: 15 octubre 2018]. Disponible en: <https://wiki.ewater.org.au/display/SD41/Australian+Water+Balance+Model+%28AWBM%29+-+SRG#app-switcher>.
- BEVEN, K., 2010. *Rainfall-Runoff Modelling*. Reino Unido: Wiley-blackwell. ISBN 978-0-470-71459-1.
- BOUGHTON, W., 2004. The Australian water balance model. *Environmental Modelling and Software*, vol. 19, no. 10, pp. 943-956. ISSN 13648152. DOI 10.1016/j.envsoft.2003.10.007.
- BOUGHTON, W., CHIEW, F., PODGER, G. y TUTEJA, N., 2003. *rainfal runoff library rrl* [en línea]. 2003. Australia: s.n. 1.0.5. Disponible en: <https://toolkit.ewater.org.au/Tools/RRL/downloads>.
- BREÑA PUYOL, A.F. y JACOBO VILLA, M.A., 2006. *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial* [en línea]. Mexico: Universidad Autónoma Metropolitana. Disponible en: [http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios\\_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf](http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf).
- BURBANO-GIRÓN, J., DOMÍNGUEZ, E. y ETTER, A., 2009. Modelación del efecto de escenarios de cobertura sobre la migración de nutrientes (N, P2O5) en la cuenca alta del río Magdalena (Huila, Colombia). *Ingeniería y Universidad*, vol. 13, no. 2, pp. 341-369. ISSN 01232126.



- CASTAÑEDA, Y., 2016. *Modelación del efecto del cambio de uso del suelo en la cuenca del Río Coello, bajo escenario de cambio climático, a través de la aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool)*. S.l.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- CHOW, V. Te, MAIDMENT, D.R. y MAYS, L.W., 1994. *Hidrología Aplicada*. Bogotá: Mc Graw-Hill. ISBN 0958-600-171-7.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL ALTO MAGDALENA [CAM], [sin fecha]. Diagnostico cuenca hidrográfica del Río Ceibas. [en línea]. [Consulta: 3 septiembre 2018]. Disponible en: <https://www.cam.gov.co/recurso-hidrico/pomch/category/85-rio-las-ceibas.html>.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL TOLIMA, 1995. *Resolución 2249 del 1995.pdf* [en línea]. 1995. Colombia: CORTOLIMA. Disponible en: [http://ovirtual.cortolima.gov.co/ovirtual/detreslcn.php?id\\_proc=1995afg2249&oragn=0](http://ovirtual.cortolima.gov.co/ovirtual/detreslcn.php?id_proc=1995afg2249&oragn=0).
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL TOLIMA, 1999a. *Resolución 324 de 1999* [en línea]. 1999. Colombia: s.n. Disponible en: [http://ovirtual.cortolima.gov.co/ovirtual/detreslcn.php?id\\_proc=1999afg324&oragn=0](http://ovirtual.cortolima.gov.co/ovirtual/detreslcn.php?id_proc=1999afg324&oragn=0).
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL TOLIMA, 1999b. *Resolución 325 de 1999*. 1999. Colombia: CORTOLIMA.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL TOLIMA, 2006. *Resolución 473 de 2006*. 2006. Colombia: s.n.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL TOLIMA, 2007. *Resolución 1095 de 2007*. 2007. Colombia: s.n.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL TOLIMA, [sin fecha]. II Fase Diagnostico - Río Coello. [en línea]. [Consulta: 10 agosto 2018]. Disponible en: <https://www.cortolima.gov.co/contenido/ii-fase-diagnostico-rio-coello-0>.
- CUESTA, M. y SPANJERSBERG, E., [sin fecha]. Balance hídrico. *Garbin S.A.*, pp. 13.
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADISTICA - DANE, 2010. Proyecciones de Población - Dane. [en línea]. [Consulta: 7 marzo 2019]. Disponible en: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06\\_20/ProyeccionMunicipios2005\\_2020.xls](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/ProyeccionMunicipios2005_2020.xls).
- DOMINGUEZ CALLE, E.A., 2000. Protocolo Para La Modelacion Matematica De

- Procesos Hidrológicos. *Meteorología Colombiana*, vol. 2, no. October 2000, pp. 33-38.
- DOMÍNGUEZ CALLE, E.A., ANGARITA, H. y RIVERA, H., 2010. Viabilidad para pronósticos hidrológicos de niveles diarios, semanales y decadales en Colombia. *Ingeniería e investigación*, vol. 30, no. 2, pp. 178-187. ISSN 0120-5609.
- DOMÍNGUEZ, E.A., RIVERA, H.G., SARMIENTO, R.V. y MORENO, P., 2008. Relaciones Demanda-Oferta De Agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del Recurso Hídrico Colombiano. *Revista Académica Colombiana Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 32, pp. 195-212.
- DUQUE, N., VEGA, C., ZAMORA, D., RODRIGUEZ, E. y ARBOLEDA-OBANDO, P., 2018. Multi-Structure Hydrological Ensemble to Improve Flow Daily Prediction in the Sumapaz River Basin, Colombia. *EPiC Series in Engineering*, vol. 3, pp. 62-69. DOI 10.29007/1112.
- EL TIEMPO, 2008. Afectado servicio de agua potable en Manizales y Armenia como consecuencia del invierno. [en línea]. [Consulta: 10 septiembre 2018]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-4668513>.
- ESRI, 2016. ¿Qué son los datos ráster? [en línea]. [Consulta: 6 octubre 2019]. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>.
- ESRI, [sin fecha]. ¿Qué es ArcGIS? [en línea]. [Consulta: 18 abril 2019]. Disponible en: <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>.
- EWATER TOOLKIT, [sin fecha]. RRL | Tools | eWater Toolkit. [en línea]. [Consulta: 18 abril 2019]. Disponible en: <https://toolkit.ewater.org.au/Tools/RRL>.
- FORERO, L.E.M., 2015. *Calibración de los modelos hidrológico e hidráulico para el sistema de alerta temprana para inundación por desbordamiento para la quebrada Chinguaza*. S.l.: Pontificia Universidad Javeriana.
- FRAITURE, C. Du, RUBIANO, J. y ALVAREZ, C., 1999. *Uso potencial del agua en la cuenca del Río Cabuyal, Colombia*. México D.F: Instituto Internacional del Manejo del agua.
- FRANCO IDARRAGA, F.L., 2010. Respuestas y propuestas ante el riesgo de inundación de las ciudades colombianas. *Revista de ingeniería* [en línea], vol. 31, pp. 97-108. ISSN 121-4993. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/3717/>.

GEOSPATIAL, 2013. ALOS PALSAR. [en línea]. [Consulta: 16 mayo 2019]. Disponible en: <http://www.geospatial.com.co/imagenes-de-satelite/alos-palsar.html>.

IDEAM, 2007. *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua: conocimiento hidrológico para el bienestar de la población*. S.l.: IDEAM. ISBN 9789588067230.

IDEAM, 2014. SOLICITUD DE INFORMACION - IDEAM. [en línea]. [Consulta: 14 febrero 2019]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>.

IDEAM, [sin fecha]. Volcán Nevado Del Tolima. [en línea]. [Consulta: 27 diciembre 2018]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/volcan-nevado-tolima>.

INFORMÁTICA HOY, 2016. Que son los archivos DEM? [en línea]. [Consulta: 16 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.informatica-hoy.com.ar/aprender-informatica/Que-son-archivos-DEM.php>.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM, 2010. *Leyenda nacional de coberturas de la tierra*. Bogotá D.C.: Editorial cripto Ltda. ISBN 9789588067292.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM, 2015. *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá: IDEAM. ISBN 978-958-8067-70-4.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM, 2017. *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogotá: s.n. ISBN 978 958 8067 95 7.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI, 2004. *Estudio general de suelos y zonificación de tierras Departamento de Tolima*. S.l.: s.n. ISBN 958-9067-74-3.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI, [sin fecha]. Datos Abiertos Agrología. .

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI, I., 1994. *Estudio general de suelos del departamento del Huila*. Bogotá: IGAC.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVIAS, [sin fecha]. Mapa de Carreteras. Colombia. [en línea]. Disponible en: <https://hermes.invias.gov.co/carreteras/>.

JASON, [sin fecha]. Australian Water Balance Model ( AWBM ). [en línea].

- [Consulta: 3 agosto 2018]. Disponible en: <https://support.goldsim.com/hc/en-us/articles/115008698407-Australian-Water-Balance-Model-AWBM->.
- KAUNE, A., 2013. *Surface water assessment and water supply reliability: Pamplonita Basin, Colombia and Venezuela*. S.l.: UNESCO-IHE Institute for Water Education.
- LOZANO, R., 2008. *Protocolo para la emision de los pronosticos hidrologicos* [en línea]. Instituto. Colombia: s.n. ISBN 9789588067193. Disponible en: [https://www.siac.gov.co/documentos/Protocolo emision.pdf](https://www.siac.gov.co/documentos/Protocolo%20emision.pdf).
- LUX, B., 2014. Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. *Maestría en Energía y Ambiente* [en línea], pp. 8. Disponible en: [http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas.pdf](http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20Cuencas%20Hidrogr%C3%A1ficas.pdf).
- MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL DE COLOMBIA, [sin fecha]. ¿Qué es un SIG? [en línea]. [Consulta: 18 abril 2019]. Disponible en: <https://www.mineducacion.gov.co/1621/article-190610.html>.
- MOLNAR, P., 2011. «Calibration». *Watershed Modelling, SS 2011*. 2011. Zürich. Switzerland: Institute of Environmental Engineering.
- MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., LIEW, M.W. Van, BINGNER, R.L., HARMEL, R.D. y VEITH, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, vol. 50, pp. 885-900. ISSN 0001 2351.
- NARANJO, Y.L., 2011. *Estudio comparativo de modelos multiparametricos de balance hídrico a nivel mensual en cuencas hidrográficas de Cundinamarca y Valle del Cauca*. S.l.: Pontificia Universidad Javeriana.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION NOAA, 2002. Conceptualization of the Sacramento Soil Moisture Accounting Model. [en línea]. [Consulta: 15 agosto 2018]. Disponible en: [https://www.nws.noaa.gov/ohd/hrf/nwsrfs/users\\_manual/part2/\\_pdf/23sacsma.pdf](https://www.nws.noaa.gov/ohd/hrf/nwsrfs/users_manual/part2/_pdf/23sacsma.pdf).
- NOAA'S CLIMATE PREDICTION CENTER, [sin fecha]. NOAA's Climate Prediction Center. [en línea], [Consulta: 27 julio 2019]. Disponible en: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).
- OPPENHEIMER, A., 2018. *¡Salvense quien pueda!* Penguin Ra. Mexico D.C.: s.n. ISBN 978-607-317-219-6.

- PODGER, G., 2004. Rainfall Runoff Library User Guide - eWater Toolkit. ,
- PONCE, V.M., 1989. *Engineering Hydrology, Principles and Practices*. New Jersey: Prentice Hill. ISBN 0-13-277831-9.
- RASMUSSEN, E.M. y CARPENTER, T.H., 1982. Variations in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review* [en línea], vol. 110, no. 5, pp. 354-384. [Consulta: 27 julio 2019]. ISSN 0027-0644. DOI 10.1175/1520-0493(1982)110<0354:VITSST>2.0.CO;2. Disponible en: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281982%29110%3C0354%3AVITSST%3E2.0.CO%3B2>.
- ROLDÁN, E. y CARVAJAL, L.F., 2007. Agregado Gr4J Aplicación : Cuenca Del Río Aburrá. *Dyna. Facultad de Minas. Universidad Nacional sede Medellín*, vol. 74, no. 152, pp. 73-87.
- SHADIA FREYLE, 2019. Al menos 6000 reses mueren por causa del fuerte verano y la falta de alimentos en Sucre. [en línea]. [Consulta: 17 abril 2019]. Disponible en: <https://canal1.com.co/noticias/nacional/al-menos-6000-reses-mueren-por-causa-del-fuerte-verano-y-la-falta-de-alimentos-en-sucre/>.
- SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE COLOMBIA, [sin fecha]. SIAC Catálogo de mapas. .
- UCHA, F., 2011. Definición de Percentil. [en línea]. [Consulta: 22 septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.definicionabc.com/general/percentil.php>.
- USOCOELLO, 2013. Distrito de riego Usocoello. [en línea]. [Consulta: 7 marzo 2019]. Disponible en: <http://www.usocoello.com/portafolio/historia.php>.